

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Інститут енергозбереження та енергоменеджменту

Кафедра інженерної екології

«На правах рукопису»

УДК 502.504.621

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Ткачук К.К.  
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2019\_\_ р.

**Магістерська дисертація**

зі спеціальності \_\_\_\_\_ 101 «Екологія»  
(код і назва спеціальності)

на тему «Ексерго-екологічний аналіз та оптимізація ТЕЦ»

Виконала: студентка 2 курсу, групи ОЗ-71н

\_\_\_\_\_ Радецька Олександра Йосипівна  
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник \_\_\_\_\_ проф., д.т.н., Ткачук К.К.  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент к.т.н., Данілін Олександр Валерійович  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації  
немає запозичень з праць інших авторів  
без відповідних посилань.  
Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2019 року

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Інститут енергозбереження та енергоменеджменту

Кафедра інженерної екології

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-науковою програмою Спеціальність – 101 «Екологія»

Спеціалізація – Інженерна екологія та ресурсозбереження

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Ткачук К.К.  
(підпис) (ініціали, прізвище)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

### ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Радецькій Олександрі Йосипівні

1. Тема дисертації «Ексерго-екологічний аналіз та оптимізація ТЕЦ»

науковий керівник дисертації Ткачук Костянтин Костянтинович, д.т.н., професор

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «19» березня 2019 р. № 926-С

2. Строк подання студентом дисертації \_\_\_\_\_

3. Об'єктом дослідження є забруднення атмосферного повітря викидами ТЕЦ при спалюванні ТПВ.

4. Предметом дослідження є технологічні умови та параметри, що впливають на зменшення викидів вуглекислого газу, оксидів нітрогену, хлоридів водню, сірчистого ангідриду від теплоелектроцентралей на відновлюваних джерелах енергії.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: зробити аналіз наукових та практичних досягнень екологічних методів оцінювання впливу на довкілля від підприємств паливно-енергетичного комплексу; виконати моделювання в програмному забезпеченні Ebsilon Professional теплоелектроцентралі та провести ексерго-екологічний аналіз; встановити залежності концентрацій викидів вуглекислого газу, оксидів нітрогену, хлоридів водню, сірчистого

ангідриду від зміни хімічного складу ТПВ та технологічних параметрів; розробити стартап-проект.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу 15 таблиць, 11 рисунків, 24 формули.

7. Орієнтовний перелік публікацій Результати наукових досліджень були представлені в матеріалах XI Міжнародної науково-технічної конференції “Енергетика. Екологія. Людина”, ІЕЕ.

8. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Нормконтроль	Репін Микола Володимирович		

9. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Аналіз сучасних та практичних підходів щодо оцінювання впливу об’єктів енергетики	28.12.2017р.	Виконано
2.	Обґрунтування доцільності застосування ексерго-екологічного аналізу для енергетичної галузі з метою ресурсозбереження та підвищення рівня екологічної безпеки	16.02.2018р.	Виконано
3.	Підвищення рівня екологічної безпеки ТЕЦ за допомогою управління технологічними параметрами із застосуванням ексерго-екологічного аналізу	09.04.2018р.	Виконано
4.	Стартап-проект	24.04.2018р.	Виконано

Студент

\_\_\_\_\_  
(підпис)

О. Й. Радецька

\_\_\_\_\_  
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

\_\_\_\_\_  
(підпис)

К. К. Ткачук

\_\_\_\_\_  
(ініціали, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація складається зі вступу, 4 розділів та висновків. Робота виконана в обсязі 99 сторінок, містить 11 рисунків, 15 таблиць, 24 формули, 1 додаток.

Мета дослідження – підвищити рівень екологічної безпеки в районах забруднення атмосферного повітря викидами ТЕЦ за допомогою ексерго-екологічного аналізу.

Об'єктом є забруднення атмосферного повітря викидами ТЕЦ при спалюванні ТПВ.

Предметом дослідження є технологічні умови та параметри, що впливають на зменшення викидів вуглекислого газу, оксидів нітрогену, хлоридів водню, сірчистого ангідриду від теплоелектроцентралей на відновлюваних джерелах енергії.

Методи дослідження: системний аналіз науково-технічної літератури – для аналізу праць відомих вчених та дослідження питань в межах магістерської дисертації; комп'ютерне моделювання в програмному забезпеченні Ebsilon Professional для симуляції технологічної схеми теплоелектроцентралі та отриманні відповідних термодинамічних параметрів системи; метод сучасної прикладної термодинаміки, що ґрунтується на поєднанні ексергетичного аналізу та оцінюванні життєвого циклу продукту для апроксимації даних; методи сучасних комп'ютерних технологій обробки інформації, зокрема, пакет прикладної програми MS Excel; методи

обчислювальної техніки при проведенні розрахунків; графіко-аналітичний аналіз – для наочного аналізу отриманих результатів.

В роботі проведено ексерго-екологічний аналіз теплоелектроцентралі, що працює на ТПВ та визначені компоненти, які здійснюють найбільший вплив на навколишнє середовище, враховуючи весь життєвий цикл обладнання. Встановлено залежності концентрацій вуглекислого газу, оксидів нітрогену, хлоридів водню, сірчистого ангідриду від кількості води, витрати повітря та метанолу в камері згоряння ТПВ.

Результати досліджень доцільно застосовувати для оптимізації технологічних параметрів та умов щодо зменшення концентрацій викидів теплоелектроцентралей, що утилізують ТПВ.

Ключові слова: тверді побутові відходи, ресурсозбереження, теплоелектроцентрально, термічна утилізація, камера згоряння, метанол.

## ABSTRACT

The master thesis consists of an introduction, 4 chapters and conclusions. The work was done in the volume of 99 pages, it contains 11 figures, 15 tables, 24 formulas, 1 application.

The goal of the study is to improve the level of environmental safety in the areas of air pollutions from the CHP plant using exergo-environmental analysis.

The object is the pollution of atmospheric air emissions from burning the municipal solid waste of CHP plant.

The subject of the study is the technological conditions and parameters that influence the reduction of carbon dioxide, nitrogen oxides, hydrogen chloride and sulfur dioxide emissions from CHP on renewable energy sources.

The research methods: systematic analysis of scientific and technical literature was used for the analysis of the works of famous scientists and research issues within the framework of the master thesis; computer simulation in the Ebsilon Professional software for simulating the technological scheme of the CHP plant and obtaining the corresponding thermodynamic parameters of the system; the method of contemporary thermodynamics based on a combination of exergy analysis and product life cycle assessment for data approximation; methods of modern computer technology of information processing, in particular, the package of MS Excel application; computing methods in conducting calculations; graphical-analytical analysis for a visualization of the results.

The exergo-ecological analysis of a heat and power plant operating on municipal solid waste was conducted, and some components that have the most significant impact on the environment with taking into account the entire life cycle of equipment was found out. The dependence of carbon dioxide, nitrogen oxides, hydrogen chloride and sulfur dioxide emissions using the water, air flow and methanol has been determined.

The obtained results must be considered to optimize technological parameters and conditions for diminishing the emission concentrations of utilizing solid waste heat and power plants.

Keywords: municipal solid waste, resource conservation, CHP plant, thermal utilization, combustion chamber, methanol.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ І ПОЗАЧЕНЬ.....	10
ВСТУП .....	12
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТА ПРАКТИЧНИХ ПІДХОДІВ ЩОДО ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ ОБ'ЄКТІВ ЕНЕРГЕТИКИ НА СТАН НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ТА РІВЕНЬ ЇХ РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ.....	15
1.1 Актуальність дослідження .....	15
1.2 Принцип роботи ТЕС та сучасні проблеми теплоенергетики, що впливають на екологічну ситуацію .....	18
1.3 Аналіз екологічних методів та наукових досліджень .....	29
1.4 Оцінка сучасного стану досліджень з питань екологічного аналізу та постановка завдань дослідження.....	36
РОЗДІЛ 2 ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЕКСЕРГО- ЕКОЛОГІЧНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ГАЛУЗІ З МЕТОЮ РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ.....	39
2.1 Теоретичне обґрунтування доцільності застосування ексерго- екологічного методу .....	39
2.2 Апробація ексерго-екологічного аналізу на прикладі ТЕЦ.....	48
2.3 Оцінка ефективності застосування ексерго-екологічного методу з метою підвищення енергоефективності об'єктів теплоенергетики та зменшення навантаження на довкілля .....	57
Висновки до розділу 2 .....	59



РОЗДІЛ 3 ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ТЕЦ ЗА ДОПОМОГОЮ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЕКСЕРГО-ЕКОЛОГІЧНОГО АНАЛІЗУ .....	60
3.1 Визначення технологічних параметрів за допомогою ексерго-екологічного аналізу, що здійснюють вплив на показники ресурсозбереження промислового об'єкта.....	60
3.2 Визначення закономірностей зміни кількості викидів від технологічних параметрів .....	63
3.3 Використання синтетичних цеолітів для очищення відхідних газів від діоксидів сірки.....	75
Висновки до розділу 3 .....	77
РОЗДІЛ 4 СТАРТАП-ПРОЕКТ .....	79
4.1 Опис ідеї проекту .....	80
4.2 Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї.....	81
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту .....	82
Висновки до розділу 4 .....	84
ВИСНОВКИ .....	86
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	89
ДОДАТОК А.....	98

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ І ПОЗНАЧЕНЬ

### Скорочення

ОВНС – ооцінка впливу на стан навколишнього середовища;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

ТЕС – теплоелектростанція;

ТЕЦ – теплоелектроцентрально;

КЕС – конденсаційні електростанції;

ДВЗ – двиун внутрішнього згоряння;

ОЖЦ – оцінка життєвого циклу;

ТПВ – тверді побутові відходи;

ЕС – Європейський Союз;

КЗ – камера згоряння;

ПТ – парова турбіна;

ВТ – високого тиску;

НТ – низького тиску;

ISO – International organization for standardization;

MIPS – Material input per service unit;

RIAM – Rapid impact assessment matrix;

WTE – відходи в енергію;

GT – газова турбіна;

### Позначення

*E* – ексергія;

$W$  – потужність;

$H$  – ентальпія;

$M$  – масова витрата;

$B$  – вплив на довкілля ексергетичного потоку;

$b$  – питомий вплив на довкілля ексергії;

$\varepsilon$  – ексергетичний коефіцієнт корисної дії;

$Y$  – сумарний вплив на довкілля на стадіях виробництва, експлуатації та утилізації;

$f$  – ексерго-екологічний фактор;

### **Індекси нижні**

$F$  – паливо;

$P$  – продукт;

$D$  – деструкція;

$L$  – втрати;

$k$  – компонент системи;

$tot$  – система в цілому;

$\phi iz$  – фізична;

$xim$  – хімічна;

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Необхідність в підвищенні енерго- та ресурсоефективності енергетичної галузі та дотриманні відповідних міжнародних екологічних стандартів потребує впровадження нових сучасних методів аналізу, що дозволяють оптимізувати підприємства ТЕС та ТЕЦ, поєднуючи термодинамічні та екологічні параметри.

**Зв'язок роботи з науковими програмами.** Актуальність даного дослідження зумовлена оновленою Енергетичною стратегією України до 2035 року: “Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність”, зокрема щодо оптимізації енергетичного сектору.

**Мета дослідження** – підвищити рівень екологічної безпеки в районах забруднення атмосферного повітря викидами ТЕЦ за допомогою ексерго-екологічного аналізу.

### **Задачі дослідження:**

- провести аналіз наукових та практичних досягнень з питань оцінювання впливу на довкілля від підприємств паливно-енергетичного комплексу;
- провести ексерго-екологічний аналіз, використовуючи програмне забезпечення Ebsilon Professional теплоелектроцентралі;
- встановити залежності концентрацій викидів вуглекислого газу, оксидів нітрогену, хлоридів водню, сірчистого ангідриду від хімічного складу ТПВ та технологічних параметрів;

— розробити стартап-проект для впровадження ідеї ексерго-екологічного методу на підприємствах теплоелектростанцій та централей.

**Об’єкт дослідження** – забруднення атмосферного повітря викидами ТЕЦ при спалюванні ТПВ.

**Предмет дослідження** – технологічні умови та параметри, що впливають на зменшення викидів вуглекислого газу, оксидів нітрогену, хлоридів водню, сірчистого ангідриду від теплоелектроцентралей на відновлюваних джерелах енергії.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставлених завдань у роботі було використано наступні методи: системний аналіз науково-технічної літератури – для аналізу праць відомих вчених та дослідженні питань в межах магістерської дисертації; комп’ютерне моделювання в програмному забезпеченні Ebsilon Professional для симуляції технологічної схеми теплоелектроцентралі та отриманні відповідних термодинамічних параметрів системи; метод сучасної прикладної термодинаміки, що ґрунтується на поєднанні ексергетичного аналізу та оцінюванні життєвого циклу продукту для апроксимації даних; методи сучасних комп’ютерних технологій обробки інформації, зокрема, пакет прикладної програми MS Excel; методи обчислювальної техніки при проведенні розрахунків; графіко-аналітичний аналіз – для наочного аналізу отриманих результатів.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

- вперше за допомогою ексерго-екологічного аналізу ТЕЦ, що працює на ТПВ визначено компоненти, які здійснюють найбільший вплив на навколишнє середовище, враховуючи весь життєвий цикл обладнання;
- встановлено залежності концентрацій викидів від кількості води та витрати повітря у камері згоряння;
- вперше встановлено залежності концентрацій вуглекислого газу та оксидів азоту від кількості метанолу у камері згоряння ТПВ.

**Практичне значення одержаних результатів.** Результати досліджень доцільно застосовувати для оптимізації технологічних параметрів та умов щодо зменшення концентрацій викидів теплоелектроцентралей, що утилізують ТПВ.

**Апробація результатів дослідження.** Результати наукових досліджень були представлені в матеріалах XI Міжнародної науково-технічної конференції “Енергетика. Екологія. Людина”, ІЕЕ.

# **1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ НАУКОВИХ ТА ПРАКТИЧНИХ ПІДХОДІВ ЩОДО ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ ОБ'ЄКТІВ ЕНЕРГЕТИКИ НА СТАН НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ТА РІВЕНЬ ЇХ РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ**

## **1.1 Актуальність дослідження**

Сучасна екологічна політика України спрямована на трансформацію багатьох галузей промисловості та впровадження принципів, зазначених у Законі України «Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року» та проекті Закону України «Про Стратегію сталого розвитку України до 2030 року», що підкріплені міжнародними зобов'язаннями нашої країни. Відповідно до завдань, визначених в цих стратегічних документах, суб'єкти господарювання мають впроваджувати більш екологічно чисте виробництво та здійснювати екологічні інновації, спрямовані на модернізацію промислових підприємств в цілях підвищення енерго- та ресурсоефективності, а також екологічної безпеки згідно з міжнародними стандартами [1, 2]. Для створення умов і реалізації принципів стійкого розвитку, країни та організації розробляють різні методи та інструменти оцінки впливу на довкілля (ОВД).

Основним законодавчим актом в галузі екологічного оцінювання в Україні є Закон України «Про оцінку впливу на довкілля», прийнятий у 2017 році [3], у зв'язку з чим Закон України «Про екологічну експертизу» [4]

втратив свою чинність. Загальні вимоги до складання ОВД визначені у розділі «Структура і склад розділу ОВНС» ДБН А.2.2-1-2003 [5].

Відповідно до процедури, зазначеної в Законі України «Про оцінку впливу на довкілля», одним із розділів звіту є надання інформації про джерела та види можливого впливу на довкілля, яка надає загальну оцінку суб'єкта господарювання без деталізованої характеристики окремих установок і апаратів. На жаль, в Україні ОВД проводиться на етапі проектування та не може забезпечити оцінку та запобігання екологічним наслідкам, що суттєво відрізняється від світової практики, де передбачається екологічне оцінювання на всіх стадіях інвестиційного проекту.

Для виконання міжнародних угод, що стосуються дотримання відповідних європейських екологічних нормативів та стандартів, необхідно провести оптимізацію процесів та систем виробництва.

На сьогоднішній день одним із найпоширеніших інструментів оптимізації є еколого-економічний аналіз, який полягає в знаходженні науково-обґрунтованого співвідношення між матеріальними потребами розвитку та мінімізацією антропогенного навантаження. Реалізація еколого-економічного аналізу здійснюється за такими двома основними напрямками як екологічна експертиза та ОВД. Основними завданнями, що відносяться до екологічної експертизи, є науково-обґрунтована та комплексна оцінка підприємств, встановлення ступеня екологічної безпеки, виконання екологічного та економічного аналізу взаємодії екологічних систем та негативних антропогенних факторів, відповідність чинному законодавству,



оцінка ефективності проведення екологічної політики, обґрунтованість заходів, спрямованих на охорону навколишнього середовища, раціональне використання та відтворення природних ресурсів тощо. До головних завдань ОВД відноситься визначення рівня впливу при функціонуванні підприємства на навколишнє середовище за нормальних та аварійних умов, прогнозування зміни стану середовища, визначення переліку заходів з попередження та обмеження впливу діяльності на навколишнє середовище та визначення еколого-економічних наслідків від роботи промислових підприємств [3, 6, 7]. На практиці, результатом проведення еколого-економічного аналізу, як правило, є економічна оцінка екологічних аспектів діяльності підприємства.

Отже, існуючий підхід хоч і вирішує низку важливих еколого-економічних питань, проте він не дозволяє визначити можливості для підвищення екологічної ефективності, ресурсозбереження та утилізації вторинних енергоресурсів, що є актуальним питанням для об'єктів теплової електроенергетики. Вирішити це актуальне питання можна за допомогою аналізу та моделювання основних закономірностей змін екологічних показників в залежності від технологічних процесів об'єктів електроенергетики.

## 1.2 Принцип роботи ТЕС та сучасні проблеми теплоенергетики, що впливають на екологічну ситуацію

Сьогодні говорити про сталий розвиток країни неможливо без всебічного використання енергії. Енергетикою є галузь, що стосується природних ресурсів, виробництва та перетворення, передачі й використання енергії у різних формах. До основних видів енергії відноситься теплота та електрика.

Необхідність перетворення енергії пов'язана з потребою в застосуванні певних видів енергії, таких як теплота та електроенергія, в новітніх технологічних процесах за умови великого розмаїття енергетичних ресурсів для отримання цієї енергії. Ці види енергії використовуються у відмінних формах. Теплота застосовується у виді пари, нагрітих газів та води за відмінних показників температури, а електрика застосовується як змінний або постійний струм за різних рівнів напруги.

До первинних джерел теплової енергії належать такі органічні палива як нафта, природний газ, вугілля, сланці тощо. Перетворення енергії здійснюється за допомогою різних пристроїв. В Україні, як правило, використовуються наступні види установок:

- установки, що генерують енергію;
- установки, що перетворюють енергію;
- установки, що акумулюють енергію;
- установки, що транспортують енергію;

– установки, що споживають енергію.

Сьогодні основою теплової енергетики є теплові силові установки теплових електростанцій (ТЕС), що складаються зі спеціальних парових турбін та котельних агрегатів.

Питанню удосконалення установок, що перетворюють теплову енергію в електричну, приділяється багато уваги. За цінність енергетичних ресурсів, ефективність використання ресурсів, показники вдосконалення технологічних процесів та обладнання, а також певних стадій виробництва відповідає коефіцієнт корисної дії енергетичної установки. Коефіцієнт корисної дії вугільних ТЕС становить  $< 40 \%$  (при максимальному  $45 \%$ ), для парогазових та газопарових установок  $< 50 \%$  (при максимальному  $60 \%$ ) [8, 9].

Електроенергія виробляється на електричних станціях, використовуючи енергію природних ресурсів. Теплові електричні станції поділяються на наступні види:

- конденсаційні (тільки вироблюють електроенергію);
- теплофікаційні (теплоелектроцентралі).

Відмінність розташування цих станцій полягає в тому, що КЕС знаходяться біля місць видобутку корисних копалин, а ТЕЦ – біля споживачів тепла (підприємства, населені пункти). Теплоелектроцентралі у відмінності від конденсаційних електричних станцій генерують електричну

та теплову енергію (гаряча вода та пара). ТЕЦ використовують наступні види палива:

- тверде (вугілля, торф, сланець);
- рідке (мазут)
- газоподібне (природний газ, коксовий газ тощо).

Відповідно до виду теплової силової установки для роботи генератора електричні станції бувають:

- паротурбінні;
- газотурбінні;
- парогазові;
- ті, що обладнані ДВЗ.

Відповідно до часу роботи ТЕС за рік під час перекриття енергонавантаження, що характеризуються кількістю годин використання встановленої потужності  $t_{\text{вст}}$ , електричні станції прийнято поділяти на:

- базові ( $t_{\text{вст}}$  більше 6 тис. годин на рік);
- напівпікові ( $t_{\text{вст}}$  в межах від 2 тис. до 5 тис. годин на рік);
- пікові ( $t_{\text{вст}}$  менше 2000 годин на рік).

Базові електростанції – це електростанції, що відповідають максимальному постійному навантаженню. Це є, як правило, атомні електростанції, конденсаційні електростанції з високим ступенем економності та теплоелектроцентралі під час опалювального сезону.

Піковими електростанціями (гідроелектростанції, гідроакумулювальні електростанції) є електростанції, що є мобільними у сенсі швидкого запуску та зупинки. Призначення пікових електростанцій полягає у їх застосуванні в період, коли необхідно перекрити піки електронавантаження.

Напівпікові електростанції в разі зменшення навантаження, як правило, знижують свою потужність або використовуються в якості резерву.

Відповідно до технології побудови теплоелектростанції бувають:

- блочні (паротурбінна установка не пов'язана з стороннім обладнанням електричної станції);
- неблочні (пар, що йде від котла попадає у загальний трубопровід з подальшим розподіленням).

Як зазначалось раніше, електроенергія на ТЕС генерується за допомогою енергії природних ресурсів, таких як вугілля, кокс, радіоактивні елементи тощо. Паливо, наприклад вугілля, згорає у котлі з подальшим нагрівом води, що переходить у стан пари. Пара транспортується до турбіни, що перетворює тепло в механічну енергію та активізує генератори, що виробляють електричну енергію.

На сьогодні ТЕС є високотехнологічним підприємством, що містить величезну кількість спеціального устаткування. Устаткування кожної електростанції відповідає обраній схемі теплопередачі та тому виду корисних копалин, що використовується на електростанції.

Головним устаткуванням електричної станції є котельне та турбінне устаткування, що включає електрогенератор та конденсатор. Це обладнання є

стандартизованим за параметрами потужностей, пари, виробітки, напруги тощо. Вид та кількість устаткування теплоелектростанції знаходяться у відповідності до потрібної потужності та режиму функціонування. Є також допоміжне устаткування, що потрібне для транспортування тепла споживачам та для забезпечення внутрішніх потреб електричної станції.

Тип парового котла, що застосовується на електростанції, напряму залежить від виду корисних копалин, що використовуються на електричній станції. У разі використання в якості палива таких природних ресурсів як газ та вугілля, як правило, використовуються спеціальні котли з П- та Т-образною формою та баштовою установкою і ємністю для топки, що відповідає виду ресурсу. Якщо використовується паливо із вмістом золи, що легко плавиться, то застосовуються котли з рідким видаленням шлаків. До того ж наявний високий рівень, близько 90 відсотків, золотловлювання, наслідком є зниження абразивного зношування нагрівних поверхонь.

Узгодження турбін та електрогенераторів здійснюється відповідно до шкали потужностей. Кожному типу турбіни відповідає зазначений вид генератора. У випадку блочних КЕС потужності турбін ставляться у відповідність потужностям блоків, в свою чергу кількість блоків відповідає потужності електричних станцій. На теперішній час блоки оснащуються конденсаційними турбінами в 150, 200, 300, 500, 800 та 1200 мегават.

На теплоелектроцентралях часто використовуються турбіни з протитиском, конденсацією та виробничим відбором пари. На сьогоднішній день на ТЕЦ розповсюджені установки в 100 та 50 мегават. ТЕЦ поблизу

крупних центрів використовують установки в діапазоні від 175 до 185 мегават, а також 250 мегават.

Головний принцип функціонування електричних станцій полягає в тому, що сумарна електроенергія, що генерується, має чітко співвідноситись до показників споживання. Більшість електростанцій функціонує паралельно в симбіозному утворенні, перекриваючи повне електронавантаження системи, а ТЕЦ, в свою чергу, також і теплову загрузку ділянки. Існують також електричні станції локального призначення, що не підключаються до загальної системи.

Відображення залежності електроспоживання від часу називається графіком електронавантаження. Щодобові графіки електронавантаження відрізняються залежно від пори року та дня. Мінімальне навантаження припадає на ніч, а максимальне – на пікові години. Крім добових графіків мають місце річні графіки електронавантаження, що базуються на попередніх даних за добу.

Ці графіки використовують під час планування електронавантажень електричних станцій та електросистем, під час розподільних дій. Також вони використовуються для селекційних розрахунків устаткування, для визначення потужностей та резервних значень, при підготовці планових ремонтних процедур тощо.

Під час повного навантаження устаткування ТЕС розвиває максимальну потужність. За цієї потужності устаткування має функціонувати за умов максимальних (номінальних) значень. Основна характеристика

електричної станції – установлена потужність, що рахується в якості суми номінальних потужностей генераторів та теплоустаткування.

Функціонування ТЕС також характеризується часом використання установленної потужності, що залежить від режиму роботи електричної станції. Електричні станції, що працюють у базовому режимі, мають час використання приблизно від 6 тис. до 7,5 тис. годин на рік, в той час як для пікових – менше 2-3 тис. годин на рік.

Навантаження, при якому обладнання працює з максимальним коефіцієнтом корисної дії, називається економічним навантаженням. Номінальне навантаження в деяких випадках може співпадати з економічним навантаженням. Навантаження, при якому устаткування функціонує в стійкому режимі при розрахунковому навантаженні з номінальними значеннями прийнято називати стаціонарним.

Режим функціонування з встановленим навантаженням, що відрізняється від розрахункового, чи з невстановленими навантаженнями називається нестаціонарним або змінним режимом. За змінного режиму частина параметрів остається незмінною та має номінальні значення, інша частина змінюється в заданих допустимих границях. Наприклад, під час часткового навантаження блоку тиск та температура пари мають номінальне значення, а конденсаторний вакуум та значення пари змінюють значення відповідно до навантаження. Є випадки, коли виникає нестаціонарний режим, тобто зміни зазнають усі основні параметри. Таке трапляється під час запуску та зупинки устаткування, скиданні та накиданні навантаження



турбогенератора, під час роботи зі змінними параметрами та має назву нестационарного режиму.

Теплове навантаження електричної станції потрібне для технологічних процесів та промислового обладнання, задля опалення та вентиляції житлових об'єктів, а також кондиціонування тощо. Якщо йдеться про процеси виробництва, то, як правило, тиск пари знаходиться в межах від 0,15 МПа до 1,6 МПа. Для невілювання транспортувальних втрат та уникання потреби в постійному дренаванні води з комунікаційних об'єктів, вихідну температуру пари на електричній станції збільшують. Наприклад, для опалення житлових об'єктів та для побутових потреб гаряча вода від ТЕЦ подається при температурі 70 – 180 °С [10].

Теплове навантаження залежить від витрати тепла на технологічні процеси та постачання гарячої води, а також від температури повітря зовні. Як промислове так і побутове теплове навантаження має тенденцію до зміни впродовж доби, а також середньодобове навантаження електричної станції для побутових потреб не є постійним для робочих та вихідних днів.

Існує ряд техніко-економічних показників, що характеризують ефективність функціонування ТЕС. Одні мають відношення до досконалості теплових процесів, такі як витратні показники та коефіцієнт корисної дії, другі – до умов функціонування ТЕС.

Найважливішим показником функціонування ТЕС є собівартість електричної енергії та теплоти.

Якщо порівнювати теплоелектростанції з іншими видами електростанцій то можна виділити їх основні переваги та недоліки. До переваг ТЕС можна віднести:

- досить безпроблемне розташування, що пов'язано з великою кількістю родовищ корисних копалин;
- незалежність генерування електроенергії із заданою потужністю від пори року;
- спеціальні зони відчуження, які неможливо використовувати для сільськогосподарських цілей (територія самої станції, санітарна зона тощо), займають набагато меншу площу, на відмінно від атомних електростанцій або гідроелектростанцій;
- швидкість спорудження та вартісні показники.

До недоліків ТЕС можна віднести:

- експлуатація ТЕС потребує значної кількості обслуговуючого персоналу (порівнюючи з гідроелектростанціями), через велику кількість супровідних робіт у циклі;
- функціонування теплоелектростанцій залежить від доставки корисних копалин (газ, вугілля та мазут тощо);
- зміна режимів функціонування ТЕС призводить до зниження ефективності, підвищення витрат паливних ресурсів, а також прискорює темпи амортизації устаткування;

- ТЕС, що експлуатуються, мають досить низький коефіцієнт корисної дії порівняно з іншими типами електростанцій;
- експлуатація ТЕС призводить до значного негативного впливу на довкілля.

Найбільш негативний вплив на довкілля вносять електричні станції, що використовують в якості палива вугілля, особливо у випадку, якщо воно є високозольним. Мінімальний негативний вплив на навколишнє природне середовище здійснюють ТЕС, що використовують природний газ.

Згідно з приблизними підрахунками у рік ТЕС по всьому світу здійснюють викид в атмосферне повітря 200 – 250 млн. тонн золи, більш ніж 60 млн. тонн сульфідного ангідриду, великий об'єм оксидів азоту та вуглекислого газу, що призводить до парникового ефекту та, у свою чергу, до глобальних змін планетарного клімату, при цьому знижуючи частку кисню в атмосфері. Також відомо, що фон радіації біля вугільних ТЕС набагато перевищує радіаційний фон атомних електростанцій, тому що вугілля вміщує ряд радіоактивних елементів та сполук у формі мікроскопічних домішків. Проте, враховуючи високотехнологічне будівництво, професійне устаткування та експлуатаційні характеристики ТЕС, а також нижчу вартість спорудження теплоелектростанції домінують у світі за кількістю виробленої електричної енергії. Це є причиною того, що у світі постійно удосконалюються технологічні аспекти побудови та функціонування ТЕС, а також приділяється значна увага питанню зниження негативного впливу на довкілля [9, 11].

Екологічні проблеми підприємств теплової електроенергетики в межах України займають провідне місце, оскільки на галузь припадає майже 80% загальнонаціональних викидів діоксиду сірки та 25% оксидів азоту. На жаль, ці показники українських електростанцій значно перевищують норми, встановлені стандартами ЄС, і згідно з оцінками, викиди підприємств і надалі перевищуватимуть гранично допустимі рівні [12].

Одним із факторів, що стосується причин недотримання екологічних стандартів є експлуатація застарілого обладнання, введеного в 1960 – 1970 роках, яке не відповідає сучасним екологічним нормативним вимогам та має дуже низький коефіцієнт корисної дії, порівняно з електростанціями в розвинених країнах. Тому близько 42% зі сумарної встановленої потужності ТЕС України повинні бути замінені та модернізовані [13]. Через низьку ефективність енергетичного обладнання, впровадження сучасних очисних технологій є економічно недоцільним, тому, що воно потребує збільшення додаткової частки електроенергії на власні потреби та значних витрат на технічне обслуговування.

Іншою не менш важливою складовою є вид та якість спалюваного палива, що впливає безпосередньо на кількісні та якісні характеристики викидів шкідливих речовин у довкілля. В Україні близько 90% енергоблоків спроектовані для використання вугільного палива, якість якого не відповідає проектним показникам та знизилася на 10% у 2015 році в порівнянні з 1975 роком, що відбулося в результаті підвищення в хімічному складі палива частки вологості та зольності [14].

### 1.3 Аналіз екологічних методів та наукових досліджень

У світі широке розповсюдження у сфері оцінки впливу на навколишнє середовище отримав метод оцінки життєвого циклу (ОЖЦ). Методологія була стандартизована та описана міжнародною організацією зі стандартизації (ISO) в стандартах ISO 14040-14044. Даний метод визначає оцінку життєвого циклу як збір даних, вхідних та вихідних показників та потенційний вплив на навколишнє середовище протягом всього життєвого циклу продукції [12]. ОЖЦ здійснює визначення кількісної та якісної оцінки впливу на навколишнє середовище, розрахунок викидів, використаної енергії та ресурсів, а також можливостей для покращення екологічної ситуації [15].

Відповідно до ISO 14040, процедура оцінки життєвого циклу відбувається в чотири послідовні етапи:

1. Визначення цілі та області використання;
2. Інвентаризаційний аналіз життєвого циклу;
3. Оцінка впливу на протязі життєвого циклу;
4. Інтерпретація життєвого циклу.

Перший етап охоплює послідовне прийняття припущень і послідовне визначення системних меж, щоб забезпечити надійне порівняння різних систем.

На другому етапі відбувається розрахунок всіх вхідних і вихідних потоків системи. Попит на дослідження непрямих матеріальних та енергетичних потоків, призводить до нескінченного числа залучених

процесів. Наприклад, об'єкти промислового призначення, що потребують енергію, сировину, капітальні витрати. Можливим способом уникнення цих труднощів є використання аналізу вводу-виводу. Таблиці вводу-виводу потоків національної економіки описують все виробництво галузей і взаємозалежність між ними. Додаючи до ідентифікаційних таблиць спеціальні коефіцієнти, наприклад: коефіцієнт викидів, коефіцієнт утилізації відходів. Можна врахувати всі матеріальні та енергетичні потоки створені виробництвом певного продукту.

На третьому етапі за допомогою моделі оцінки впливу ECOSENSE, яка є інструментом для вивчення впливу забруднювачів повітря, здійснюється кількісне визначення впливу системи на навколишнє середовище та здоров'я людини.

Останній крок потребує вагових коефіцієнтів для кожного впливу, кількісно визначених в аналізі, щоб перетворити їх в єдину систему характеристик. Існує декілька різних підходів для встановлення вагових коефіцієнтів. Наприклад, метод монетаризації, який оцінює вплив, беручи до уваги витрати на ремонт, витрати на уникнення впливу.

Для визначення матеріаломісткості та ресурсоефективності на всіх етапах життєвого циклу використовують концепцію MIPS-аналізу (Material Input per Service unit), яка характеризує сумарну кількість матеріальних ресурсів, необхідних для виробництва продукції чи послуги. Показник MIPS є досить ефективним інструментом в напрямку сталого розвитку для оцінки

превентивних засобів в цілях захисту навколишнього середовища, які неможливо оцінити використовуючи інші екологічні індикатори [16].

$$R_{\text{пр}} = R_n / Q,$$

де  $R_{\text{пр}}$  – питоме споживання природних ресурсів на одниницю готової продукції;

$R_n$  – витрата ресурсів на виробництво продукції;

$Q$  – обсяг валової продукції.

Електростанції, що працюють на вугіллі, є важливим компонентом енергетичного балансу багатьох країн. Для розрахунку впливу на навколишнє середовище теплової електростанції використовують методи оцінювання по багатьох критеріях та нечіткої логічної моделі, що враховують наступні елементи навколишнього середовища: CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, тверді частинки, золу, вплив охолоджувальної води на біоту і теплове забруднення.

Оцінювання цих параметрів навколишнього середовища проводилося за допомогою статистичного аналізу даних екологічного моніторингу та технічних даних електростанції, замість симуляційних методів аналізу. Даний метод оцінює кожний фактор впливу на навколишнє середовище

окремо, а потім об'єднує їх шляхом розрахунку оцінки впливу на навколишнє середовище.

Індекс впливу підприємства на довкілля розраховується за наступною формулою [17]:

$$CSI = w_1 * S_1 + w_2 * S_2 + \dots w_n * S_n,$$

де  $w_1$  – ваговий коефіцієнт показника;

$S_1$  – оцінка параметра, обчисленого за допомогою функції нечіткої логічної моделі;

$n$  – кількість параметрів навколишнього середовища.

Значення індексу знаходяться в діапазоні від 0 до 1, чим вище індекс тим більший вплив підприємства на довкілля. Однією з найважливіших складових цього методу є те, що виміряні параметри навколишнього середовища перетворюються на безрозмірну величину.

Даний метод має певні обмеження, що стосуються можливості використання тільки під час експлуатації електростанції, а також потреба в даних моніторингу. Індекс впливу підприємства на навколишнє середовище вже застосовується до декількох електростанцій в Туреччині. Отже, описаний інструмент сприяє визначенню екологічних показників електростанції під час експлуатації, а також може бути використаний у процесі прийняття інвестиційних рішень пов'язаних із захистом довкілля.



Швидка матриця оцінки впливу або RIAM-метод використовується для оцінки всіх видів впливів на навколишнє середовище. Метод полягає у стандартному визначенні важливості критеріїв при оцінці впливу та способу отримання кількісних значень, що дозволяє отримати незалежні та точні класифікації. Для структуризації оцінки впливу можна виділити чотири основні напрямки:

1. Фізичні та хімічні аспекти;
2. Біологічні та екологічні аспекти;
3. Соціологічні та культурні аспекти;
4. Економічні та експлуатаційні аспекти.

Фізичні та хімічні характеристики включають всі фізичні та хімічні параметри навколишнього середовища, а також невідновлювальні (небіологічні) природні ресурси і деградацію фізичного середовища через забруднення.

Біологічний та екологічний напрямок включає всі біологічні аспекти довкілля, відновлювальні природні ресурси, збереження біорізноманіття, взаємодію між біологічними видами та забрудненням біосфери.

До соціологічного та культурного аналізу відносяться соціальні суб'єкти, які впливають на індивідуумів та спільноти, а також розвиток людського потенціалу.

Економічний та експлуатаційний аспект визначає тимчасові та постійні якісні економічні наслідки зміни довкілля, а також складність управління проектами.

Система ґрунтується на питаннях компонентної оцінки впливу з попередньо визначеними критеріями та показниками, що описують ступінь позитивного або негативного впливу, який порівнюється за допомогою методу швидкої матриці оцінки впливу, що забезпечує цілісний аналіз.

Критеріями оцінки для різних компонентів є наступні параметри:

1. Показник важливості відповідної умови (A1) оцінюється в залежності від просторових меж. Шкала визначається наступним чином:

0 – не має значення;

1 – важливо тільки для місцевих територій;

2 – важливо для територій, що вийшли за межі місцевих;

3 – важливо для регіональних / національних інтересів;

4 – важливо для національних / міжнародних інтересів.

2. Величина (A2) визначається як міра покращення / пошкодження стану. Шкала визначається наступним чином:

+3 – переважне покращення стану;

+2 – значне поліпшення теперішнього стану;

+1 – покращення теперішнього стану;

0 – без змін;

-1 – негативні зміни теперішнього стану;

-2 – значні збитки або зміни;

-3 – переважні збитки або зміни.

Стійкість (B1): 1 – без змін; 2 – тимчасова; 3 – постійна;

Зворотність (B2): 1 – без змін; 2 – зворотна; 3 – незворотна;

Накопичення (B3): 1 – без змін; 2 – відсутнє; 3 – кумулятивне.

Загальна оцінка навколишнього середовища (ES) розраховується наступним чином:

$$A1 \times A2 = AT,$$

$$B1 + B2 + B3 = BT,$$

$$ES = AT \times BT.$$

Діапазон класифікації ES балів наведено в таблиці 1.1 [18].

Таблиця 1.1 – Класифікація підсумкового результату оцінювання

Оцінка навколишнього середовища (ES)	Значення діапазону (алфавітне)	Значення діапазону (числове)	Опис діапазону
108 до 72	E	5	Переважаючий позитивний вплив
71 до 36	D	4	Значний позитивний вплив
35 до 19	C	3	Помірний позитивний вплив
10 до 18	B	2	Позитивний вплив
1 до 9	A	1	Незначний позитивний вплив
0	N	0	Без змін
-1 до -9	-A	-1	Незначний негативний вплив
-10 до -18	-B	-2	Негативний вплив
-19 до -35	-C	-3	Помірний негативний вплив
-36 до -71	-D	-4	Значний негативний вплив
-72 до -108	-E	-5	Переважаючий негативний вплив

Метод швидкої матриці оцінки впливу є дуже корисним інструментом у процесі визначення пріоритетних напрямків, що потребують покращення та залучення інвестицій. Даний метод на практиці успішно використовується

для визначення проблем управління водними ресурсами ряду західноафриканських країн [19].

#### 1.4 Оцінка сучасного стану досліджень з питань екологічного аналізу та постановка завдань дослідження

В основних стратегічних нормативних документах щодо екологічної політики України на найближче майбутнє чітко визначені основні вектори розвитку, що стосуються екологічно чистого виробництва, підвищення енергоефективності та ресурсоефективності промислових підприємств, в тому числі і підприємств енергетичної галузі. Актуальним залишається питання відповідності національних нормативів нормам і стандартам країн Європейського Союзу. В дослідженні автором детально розглянуто принцип роботи об'єктів теплової електроенергетики, а також сучасні проблеми промислових об'єктів цієї сфери, що мають відношення до негативного впливу на навколишнє середовище.

З метою реалізації визначених завдань вже сьогодні застосовуються методи еколого-економічного аналізу, основною задачею яких є пошук науково-обґрунтованого співвідношення між матеріальними потребами розвитку та мінімізацією антропогенного навантаження. Ці методи базуються, насамперед, на процедурах проведення екологічної експертизи та оцінки впливу на довкілля, та вирішують широке коло задач. Вони є науково-обґрунтованими та ефективно використовуються для комплексного

оцінювання кількісних та якісних показників забруднення, а також показують можливості в природоохоронній діяльності.

Проте недоліком розглянутих методів, в контексті їх застосування та до об'єктів теплової електроенергетики, є неможливість визначення мінімально необхідних та фактичних енергетичних витрат технологічних процесів, джерел нераціональних витрат енергії, місць безпосереднього утворення викидів в системах тощо.

Разом з тим варто зазначити, що широкої розповсюдженості в останні роки здобули методи аналізу, що базуються на понятті ексергії термодинамічних систем, які дають можливість для знаходження проблемних місць та підвищення ефективного функціонування теплоустановок. Даний метод аналізу визначає деструкцію ексергії для кожного устаткування системи, що показує можливості для ресерсозбереження [20, 21]. Такі методи, у поєднанні із екологічними – ексерго-екологічні, надають змогу моделювати основні закономірності змін екологічних показників в залежності від технологічних процесів об'єктів теплової енергетики.

Для досягнення поставленої мети визначено наступні завдання:

— вперше проведений ексерго-екологічний аналіз теплоелектроцентралі, що працює на ТПВ та визначені компоненти, які здійснюють найбільший вплив на навколишнє середовище, враховуючи весь життєвий цикл обладнання;

— вперше визначені залежності зменшення концентрацій викидів від добавки метанолу до камери згоряння ТПВ та проведений еколого-економічний ефект;

— отримало подальший розвиток використання синтетичного цеоліту 13X для адсорбції  $\text{SO}_2$  з відхідних газів та розрахована необхідна масова витрата.

## **2 ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЕКСЕРГО-ЕКОЛОГІЧНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ГАЛУЗІ З МЕТОЮ РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ**

### **2.1 Теоретичне обґрунтування доцільності застосування ексерго-екологічного методу**

В прикладній термодинаміці застосовуються різні методи аналізу енергетичних перетворень в технічних системах. Підхід енергозбереження включає, перш за все, термодинамічний аналіз наявних систем, розроблення теплових схем на його основі, оптимізацію параметрів, інтенсифікацію процесів теплопередачі.

Найпоширенішим методом аналізу вважається метод теплових балансів, заснований на застосуванні першого закону термодинаміки. Однак, він не може дати відповідь про ступінь термодинамічної досконалості як окремого компонента, так і енерготехнологічної системи в цілому.

При використанні цього методу складаються енергетичні (теплові) баланси, на підставі яких визначаються показники роботи установок, наприклад, термічний ККД для теплових двигунів, холодильний коефіцієнт для холодильних установок, коефіцієнт перетворення (трансформації) для теплонасосних установок [22, 23].

Загальним недоліком розглянутих ККД є неможливість оцінки ступеня термодинамічної досконалості енерготехнологічної системи. Складені баланси на основі закону збереження енергії лише визначають ступінь досконалості теплоізоляції і, в деяких випадках, відведення енергії і речовини в навколишнє середовище. Під час використання складових енергетичного балансу якісна відмінність не враховується, оскільки з позиції першого закону термодинаміки всі форми енергії рівноцінні [24, 25].

В процесі аналізу термодинамічних систем необхідно враховувати не тільки перший, але і другий закон термодинаміки. Метод термодинамічного аналізу, що враховує обидва закони називається ексергетичним. Цей метод термодинамічного аналізу заснований на введенні поняття термодинамічних потенціалів. Обґрунтовано обрані термодинамічні потенціали дозволяють визначити роботоздатність потоків речовини та енергії в будь-якій точці системи.

Важливе значення для даного методу аналізу має навколишнє середовище технічної системи. Слід зазначити, що всі реальні технічні процеси відбуваються в умовах взаємодії з навколишнім середовищем. Навколишнє середовище характеризується тим, що його характеристики не залежать від параметрів даної системи і, в більшості випадків, можуть вважатися постійними. Прикладами таких середовищ можуть бути атмосфера, космічний простір.

Технічна цінність енергії залежить не тільки від її власних параметрів і форми, але і від параметрів навколишнього середовища. Таким чином, не всі



види енергії, а також не в усіх умовах можуть бути придатні для практичного використання.

З цієї точки зору, в усіх енергетичних перетвореннях, які забезпечують роботу технічних систем, може використовуватися енергія двох видів:

— енергія, що повністю перетворюється в будь-який інший вид енергії, незалежно від параметрів навколишнього середовища — «організована» форма енергії. Це, наприклад, механічна, електрична або хімічна енергія;

— енергія, яка не може бути повністю перетворена в інший вид енергії; її перетворення визначається як власними параметрами, так і параметрами навколишнього середовища — «неорганізована» форма енергії. Наприклад, енергія, що передається у вигляді теплового потоку, енергія випромінювання.

На підставі викладеного виникла необхідність введення загальної міри для всіх видів енергії, що характеризує здатність їх перетворення в інші види організованої енергії, яку називають ексергією системи.

Ексергія системи в даному стані вимірюється кількістю механічної або іншої повністю перетворюваної енергії, що може бути отримана від системи в результаті її оборотного переходу з даного стану в стан рівноваги з навколишнім середовищем.

Перевагою ексергетичного аналізу над енергетичними методами є набагато ширші можливості, що забезпечують створення принципово нових концептуальних рішень в процесах передачі та перетворення енергії, та,

найголовніше, дають обґрунтовану інформацію щодо впливу різних необоротностей системи, що впливає на загальну енергетичну ефективність.

Для підвищення термодинамічної ефективності системи на основі першого та другого законів термодинаміки для практичної реалізації необхідно враховувати також мінімізацію затрат та негативний вплив на довкілля.

Одним із найбільш поширених визначень ексергії, що базується на формулюванні В. Гібса, є максимальна теоретична корисна робота, яку можна отримати, якщо систему перевести у стан рівноваги з навколишнім середовищем [26].

Ексергетичний аналіз вказує на знаходження та значення термодинамічних необоротностей в системах перетворення енергії, що є достатнім фактором для підвищення термодинамічної ефективності [26, 27, 28, 29].

В новій методології ексергетичного аналізу використовуються поняття ексергії “палива” ( $E_F$ ) та ексергії “продукту” ( $E_P$ ) [26, 27].

Поняття ексергії “палива” стосується матеріальних та енергетичних потоків компонентів, що характеризуються зменшенням ексергії між вхідним та вихідним потоками [30].

Поняття ексергії “продукту” відноситься до всіх матеріальних та енергетичних потоків, що характеризуються збільшенням ексергії після проходження елементу системи між вхідним та вихідним потоками [30].

Відповідно до сучасної ексергетичної методології розрізняють поняття “деструкція ексергії” ( $E_D$ ) та “втрати ексергії” ( $E_L$ ) [31]. Деструкція – це втрати в системі, викликані необоротністю процесів (наприклад, теплові або механічні втрати в компонентах). Втрати ексергії визначаються для системи в цілому та стосуються обміну ексергією з навколишнім середовищем, що більше не приймає участі в системі [28, 29, 32, 33, 34]. Деструкція ексергії в установці визначає не тільки термодинамічну неефективність, але також показує можливі зменшення інвестиційних затрат та впливу системи на навколишнє середовище [28, 29, 32, 33, 34].

Ексергетичний баланс для компонента та всієї системи перетворення та передачі енергії має наступний вигляд [35, 36, 37, 38, 39, 40]:

$$E_{F,k} = E_{P,k} + E_{D,k}, \quad (2.1)$$

$$E_{F,tot} = E_{P,tot} + E_{D,tot} + E_{L,tot}. \quad (2.2)$$

Використовують наступні показники та змінні термодинамічної ефективності системи [41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48]:

— ексергетичний коефіцієнт корисної дії компонента та системи:

$$\varepsilon_k = E_{P,k} / E_{F,k}, \quad (2.3)$$

$$\varepsilon_{tot} = E_{P,tot} / E_{F,tot}. \quad (2.4)$$

— відношення деструкції ексергії компонента до ексергії палива системи:

$$y_{D,k} = E_{D,k} / E_{F,tot} . \quad (2.5)$$

— частка деструкції ексергії компонента щодо загальної деструкції системи:

$$y_{D,k}^* = E_{D,k} / E_{D,tot} . \quad (2.6)$$

— відношення втрат ексергії до ексергії палива системи:

$$y_L = E_{L,tot} / E_{F,tot} . \quad (2.7)$$

Існує багато методик поєднання ексергетичного та екологічного аналізу, наприклад, розширений ексергетичний облік [49], який базується на розрахунку зростаючого споживання ексергії та дозволяє розрахувати спричинені викиди. В даній роботі розглядається екологічний метод, на основі оцінювання життєвого циклу системи, що дозволяє визначити місце, причини впливу та можливі шляхи зменшення впливу на довкілля, як на рівні компонентів, так і системи в цілому.

Ексерго-екологічний метод аналізу складається з балансових та додаткових рівнянь впливу на довкілля [50, 51, 52, 53]. На рис. 2.1 наведено блок-схему структури ексерго-екологічного аналізу системи.

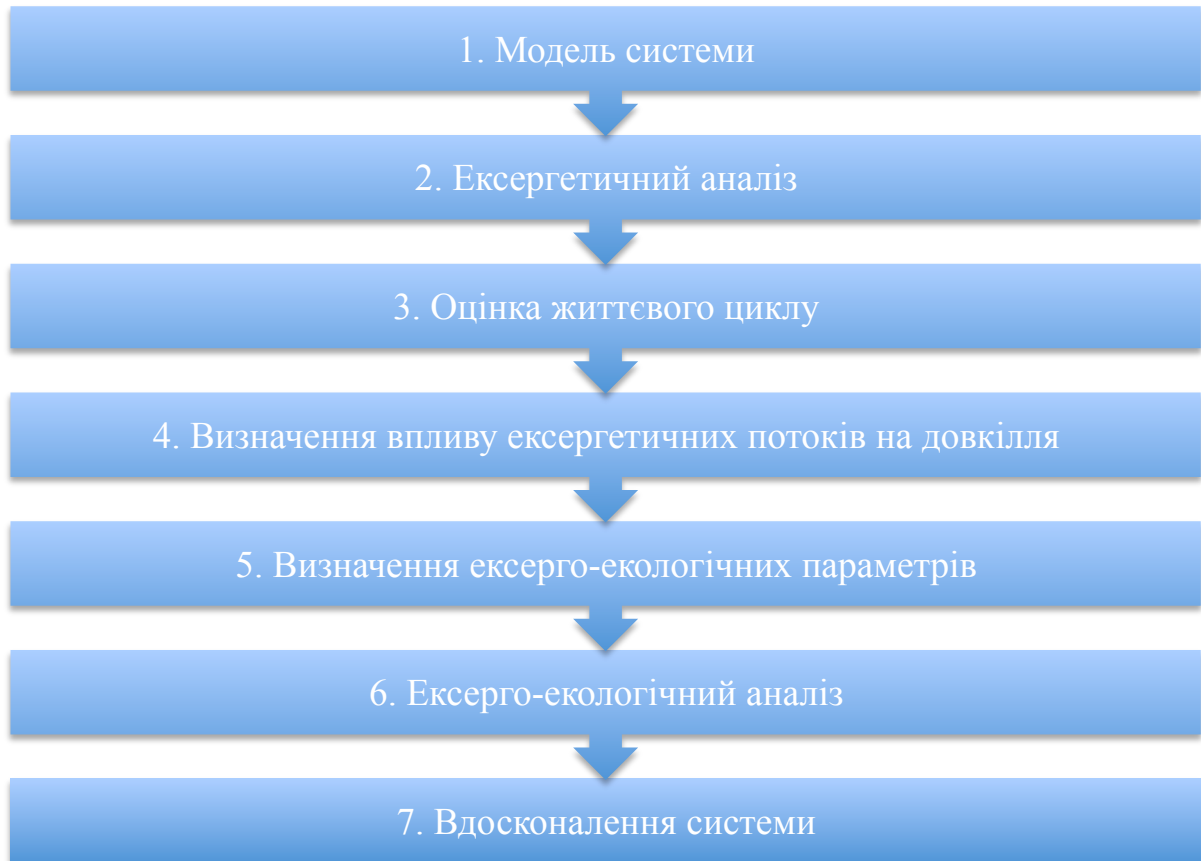


Рисунок 2.1 – Структура ексерго-екологічного аналізу системи [54]

Відповідно балансове рівняння впливу на довкілля для компонента буде мати вигляд [54]:

$$B_{P,k} = B_{F,k} + Y_k, \quad (2.8)$$

$$b_{P,k}E_{P,k} = b_{F,k}E_{F,k} + Y_k, \quad (2.9)$$

де  $B_{P,k}$  та  $B_{F,k}$  – вплив на довкілля ексергії “продукту” та “палива” відповідно, mPts;

$Y_k$  – сумарний вплив компоненту на довкілля на стадіях виробництва, експлуатації та утилізації, mPts/г;

$b_{P,k}$ ,  $b_{F,k}$  – питомий вплив на довкілля ексергії “продукту” та “палива” компоненту відповідно, mPts/ МДж;

$E_{P,k}$ ,  $E_{F,k}$  – ексергія потоку “продукту” та “палива” компоненту відповідно, МДж.

Критеріями ексерго-екологічного аналізу компонентів системи є наступні змінні [54, 55]:

— сумарний вплив компонента на довкілля на стадіях виробництва ( $Y_k^{CO}$ ), експлуатації ( $Y_k^{OM}$ ) та утилізації ( $Y_k^{DI}$ ):

$$Y_k = Y_k^{CO} + Y_k^{OM} + Y_k^{DI}. \quad (2.10)$$

— вплив на довкілля ексергії “продукту”:

$$b_{P,k} = B_{P,k} / E_{P,k}. \quad (2.11)$$

— вплив на довкілля ексергії “палива”:

$$b_{F,k} = B_{F,k} / E_{F,k}. \quad (2.12)$$

— вплив на довкілля через деструкцію ексергії:

$$B_{D,k} = b_{F,k} E_{D,k}. \quad (2.13)$$

— ексерго-екологічний фактор:

$$f_{b,k} = Y_k / (Y_k + B_{D,k}). \quad (2.14)$$

Ексерго-екологічний фактор визначає внесок окремого компонента на загальний вплив системи на довкілля. Якщо значення  $f_{b,k}$  компонента  $> 50\%$ , це означає, що вплив на стадії виробництва, технічного обслуговування та утилізації має більше негативне значення ніж отриманий вплив в процесі експлуатації даного обладнання.

Комплексний ексергетичний та екологічний (на основі оцінювання життєвого циклу) аналіз, надає можливість оцінити вплив на довкілля, пов'язаний з системами перетворення енергії на рівні компонентів та забезпечити корисною інформацією для проектування або модернізації системи з меншим загальним екологічним впливом.

## 2.2 Апробація ексерго-екологічного аналізу на прикладі ТЕЦ

Для апробації ексерго-екологічного аналізу проведена симуляція теплоелектроцентралі в програмному забезпеченні Ebsilon Professional. Технологічна схема теплоелектроцентралі наведена на рис. 2.2.

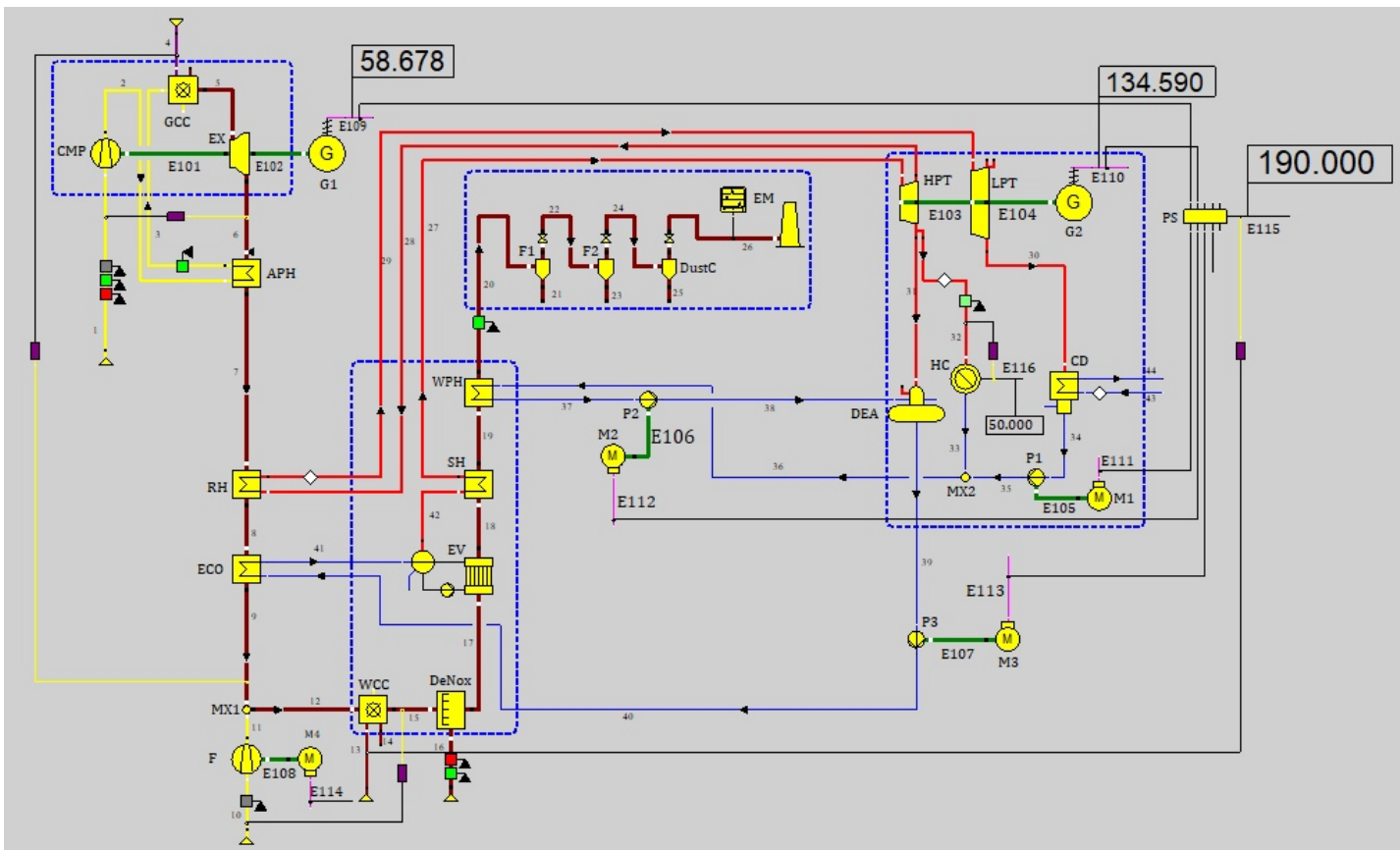


Рисунок 2.2 – Технологічна схема запропонованої ТЕЦ

Концепцією даної електростанції є використання двох видів палива: твердих побутових відходів та природного газу. Схема складається з основних циклів: газовий, генерація пари, паротурбінний та система очищення вихідних газів. Через проблеми з корозією в теплообмінниках,



спричинених продуктами горіння ТПВ, температура та тиск згенерованої пари має наступні обмеження: до 400 °C і 40 бар, що призводить до низької термодинамічної ефективності. Тому для підвищення ефективності застосована концепція “WTE-GT cold windbox integration”, яка означає використання відпрацьованих газів турбіни замість нагрітого повітря для котлів ТПВ [56]. Дана схема має низку наступних переваг.

— Не потребує попереднього підігрівання повітря для подачі в котел ТПВ, що зменшує капітальні та експлуатаційні витрати.

— Зменшення впливу на довкілля, порівнюючи з традиційними системами термічного знешкодження ТПВ.

Змодельована схема відповідає нормам директиви 2000/76/ЕС та не перевищує гранично допустимі викиди.

Електростанція виробляє 190 МВт електроенергії, близько 59 МВт газовою турбіною та 135 МВт двома паровими турбінами, а також 50 МВт теплової енергії відбирається з першої парової турбіни.

Для ексергетичного аналізу початковими умовами, що відповідають параметрам навколишнього середовища обрано наступні дані: температура 7,4 °C та тиск 0,9925 бар.

Загальна ексергетична ефективність наведеної схеми відповідає близько 39 %. Ексергетичні баланси для всієї системи наступні:

$$E_{F,tot} = E_1 + E_3 + E_{10} + E_{20} + E_{42} ,$$

$$E_{P,tot} = W_{16} + E_{27} - E_{32} ,$$

$$E_{L,tot} = E_{11} + E_{16} + E_{18} + E_{22} + E_{23},$$

де  $E_{F,tot}$ ,  $E_{P,tot}$ ,  $E_{L,tot}$  – ексергія “палива”, “продукту” та “втрат” всієї системи;

$E_i$  – загальна ексергія (хімічна та фізична) потоку  $i$ , Дж;

$W_{16}$  – номінальна потужність електростанції, Вт.

В табл. 2.1 наведені результати ексергетичного розрахунку для всіх компонентів ТЕЦ.

Таблиця 2.1 – Результати ексергетичного розрахунку компонентів системи

[Од. вимір]	$E_F$	$E_P$	$E_D$	$E_L$	$y_D$	$\varepsilon$
	[МВт]	[МВт]	[МВт]	[МВт]	[-]	[%]
Компоненти						
GT-COMP	42.52	38.86	3.66	-	0.01	91
APH	5.21	4.14	1.07	-	0.00	79
GCC	154.70	115.62	39.08	-	0.07	75
EX	103.24	102.06	1.18	-	0.00	99
RH	13.60	8.35	5.24	-	0.01	61
ECO	27.12	20.12	7.00	-	0.01	74
MX1	5.87	2.90	2.97	-	0.01	49
F	2.10	1.90	0.20	-	0.00	90
WCC	380.89	258.55	122.34	-	0.23	68
DeNox	0.25	-	0.25	-	0.00	-
EV	184.32	116.57	67.75	-	0.13	63
SH	27.59	25.65	1.94	-	0.00	93

Продовження таблиці 2.1

[Од. вимір]	$E_F$	$E_P$	$E_D$	$E_L$	$y_D$	$\varepsilon$
	[МВт]	[МВт]	[МВт]	[МВт]	[-]	[%]
Компоненти						
WPH	20.60	9.53	11.07	-	0.02	46
HPT	55.44	50.22	5.21	-	0.01	91
LPT	99.52	86.33	13.19	-	0.02	87
CD	7.64	-	7.64	-	0.01	-
P1	0.03	0.02	0.01	-	0.00	81
MX2	0.63	0.23	0.40	-	0.00	36
P2	0.07	0.06	0.01	-	0.00	86
DEA	7.91	7.19	0.72	-	0.00	91
F1	0.99	-	0.99	-	0.00	-
F2	1.10	-	1.10	-	0.00	-
P3	0.57	0.50	0.07	-	0.00	87
DustC	1.19	-	1.19	-	0.00	-
G1	59.54	58.68	0.86	-	0.00	99
G2	136.56	134.59	1.97	-	0.00	99
MT1	0.03	0.03	0.00	-	0.00	85
MT2	0.08	0.07	0.01	-	0.00	85
MT3	0.68	0.57	0.10	-	0.00	85
MT4	2.47	2.10	0.38	-	0.00	85
ЗАГ	537.29	207.09	297.62	32.58	0.55	39

Відповідно до отриманих результатів найнижчу ексергетичну ефективність мають теплообмінники, що зумовлено параметром різниці мінімальних температур холодного та гарячого потоків. Інша причина деструкції ексергії в компонентах *MX1* та *MX2* є змішування різних за цінністю теплової енергії потоків. Газовий котел та котел для термічної

утилізації ТПВ мають ефективність 75% та 68% відповідно, деструкція пов'язана з хімічними реакціями та тепловими втратами.

Екологічна складова аналізу проводилась з урахуванням оцінки життєвого циклу обладнання за допомогою методології “Еко-індикатор 99” [57]. Детальна характеристика та дані оцінки життєвого циклу наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Дані оцінки життєвого циклу системи

№	Компоненти	Класифікація	Матеріал/Процес виробництва	ЕКО 99 (mpt/кг)	М (кг)	TEI (mpt)
1	Компресор (GT-COMP)	Матеріали	Чугун	240	1700	$408 \cdot 10^3$
		Виробництво	Фрезерування	115	42	$483 \cdot 10^1$
2	Теплообмінник (APH)	Матеріали	98% Сталь 2% Мідь	86 1400	4057 83	$349 \cdot 10^3$ $116 \cdot 10^3$
		Виробництво	Металевих листів	30	4140	$124 \cdot 10^3$
3	Газовий котел (GCC)	Матеріали	Чугун	240	1400	$336 \cdot 10^3$
4	Експандер (EX)	Матеріали	88% Високолегована сталь 12% Мідь	910 1400	2112 288	$200 \cdot 10^4$ $403 \cdot 10^3$
		Виробництво	Металевих листів	30	5176	$156 \cdot 10^3$
5	Теплообмінник (RH)	Матеріали	98% Сталь 2% Мідь	86 1400	5072 104	$436 \cdot 10^3$ $146 \cdot 10^3$
		Виробництво	Металевих листів	30	5176	$156 \cdot 10^3$
6	Теплообмінник (ECO)	Матеріали	98% Сталь 2% Мідь	86 1400	50960 1040	$440 \cdot 10^4$ $146 \cdot 10^4$
		Виробництво	Металевих листів	30	52000	$156 \cdot 10^4$
7	Арматура (MX1)	Матеріали	Сталь	86	240	$206 \cdot 10^2$
8	Вентилятор (F)	Матеріали	88% Сталь 12% Низьколегована сталь	86 110	123 17	$106 \cdot 10^2$ $187 \cdot 10^1$
		Виробництво	Фрезерування	115	140	$161 \cdot 10^2$
9	Камера згоряння для ТПВ (WCC)	Матеріали	Чугун	240	9500	$228 \cdot 10^4$
10	NOx очищувач (DeNox)	Матеріали	98% Сталь 2% Гума	86 360	9800 200	$843 \cdot 10^3$ $720 \cdot 10^2$
11	Теплообмінник (EV)	Матеріали	98% Сталь 2% Мідь	86 1400	51000 1040	$439 \cdot 10^4$ $146 \cdot 10^4$
		Виробництво	Металевих листів	30	52040	$156 \cdot 10^4$

Продовження таблиці 2.2

№	Компоненти	Класифікація	Матеріал/Процес виробництва	ЕСО 99 (mpt/кг)	М (кг)	TEI (mpt)
12	Теплообмінник (SH)	Матеріали	98% Сталь 2% Мідь	86 1400	56448 1152	$486 \cdot 10^4$ $162 \cdot 10^4$
		Виробництво	Металевих листів	30	57600	$173 \cdot 10^3$
13	Теплообмінник (WRH)	Матеріали	98% Сталь 2% Мідь	86 1400	38886 794	$335 \cdot 10^4$ $112 \cdot 10^4$
		Виробництво	Металевих листів	30	39680	$119 \cdot 10^4$
14	Парова турбіна (HPT)	Матеріали	88% Високолегована сталь 12% Мідь	910 1400	126720 17280	$116 \cdot 10^6$ $242 \cdot 10^5$
15	Парова турбіна (LPT)	Матеріали	88% Високолегована сталь 12% Мідь	910 1400	126720 17280	$116 \cdot 10^6$ $242 \cdot 10^5$
16	Теплообмінник (CD)	Матеріали	98% Сталь 2% Мідь	86 1400	216 5	$186 \cdot 10^2$ $700 \cdot 10^1$
		Виробництво	Металевих листів	30	221	$663 \cdot 10^1$
17	Насос (P1)	Матеріали	69% Чугун 25% Низьколегована сталь 6% Мідь	240 110 1400	276 100 24	$663 \cdot 10^2$ $110 \cdot 10^2$ $336 \cdot 10^2$
		Виробництво	Фрезерування	115	400	$460 \cdot 10^2$
18	Арматура (MX2)	Матеріали	Сталь	86	120	$103 \cdot 10^2$
19	Насос (P2)	Матеріали	69% Чугун 25% Низьколегована сталь 6% Мідь	240 110 1400	276 100 24	$663 \cdot 10^2$ $110 \cdot 10^2$ $336 \cdot 10^2$
		Виробництво	Фрезерування	115	400	$460 \cdot 10^2$
20	Деаератор (DEA)	Матеріали	Сталь	86	4100	$353 \cdot 10^3$
		Виробництво	Металевих листів	30	4100	$123 \cdot 10^3$
21	Скрубер (F1)	Матеріали	98% Сталь 2% Гума	86 360	9800 200	$843 \cdot 10^3$ $720 \cdot 10^2$
22	Скрубер (F2)	Матеріали	98% Сталь 2% Гума	86 360	9800 200	$843 \cdot 10^3$ $720 \cdot 10^2$
23	Насос (P3)	Матеріали	69% Чугун 25% Низьколегована сталь 6% Мідь	240 110 1400	276 100 24	$663 \cdot 10^2$ $110 \cdot 10^2$ $336 \cdot 10^2$
		Виробництво	Фрезерування	115	400	$460 \cdot 10^2$
24	Пиловловлювач (DustC)	Матеріали	98% Сталь 2% Гума	86 360	11760 240	$101 \cdot 10^4$ $864 \cdot 10^2$
25	Генератор (G1)	Матеріали	88% Чугун 12% Мідь	240 1400	88000 12000	$212 \cdot 10^5$ $168 \cdot 10^5$

## Продовження таблиці 2.2

№	Компоненти	Класифікація	Матеріал/Процес виробництва	ЕСО 99 (mpt/кг)	М (кг)	TEI (mpt)
26	Генератор (G2)	Матеріали	88% Чугун 12% Мідь	240 1400	176000 24000	$423 \cdot 10^5$ $336 \cdot 10^5$
27	Двигун (MT1)	Матеріали	88% Чугун 12% Мідь	240 1400	202 28	$485 \cdot 10^2$ $392 \cdot 10^2$
28	Двигун (MT2)	Матеріали	88% Чугун 12% Мідь	240 1400	400 55	$960 \cdot 10^2$ $770 \cdot 10^2$
29	Двигун (MT3)	Матеріали	88% Чугун 12% Мідь	240 1400	3652 498	$877 \cdot 10^3$ $697 \cdot 10^3$
30	Двигун (MT4)	Матеріали	88% Чугун 12% Мідь	240 1400	13552 1848	$325 \cdot 10^4$ $259 \cdot 10^4$

Використовуючи ОЖЦ системи наступним кроком є розрахунок ексерго-екологічних показників, результати наведені в таблиці 2.3

Таблиця 2.3 – Ексерго-екологічні показники ТЕЦ

[Од. вимір.]	$Y_k$	$b_{f,k}$	$b_{p,k}$	$B_{D,k}$	$B_{D,k} + Y_k$	$f$
	[mPts/год]	[mPts/МДж]	[mPts/МДж]	[mPts/год]	[mPts/год]	[%]
Компоненти						
GT-COMP	1,94	22,6	24,69	82,64	84,58	2,29
APH	7,95	22,3	28,08	23,90	31,85	24,96
GCC	1,49	16,0	21,41	625,34	626,83	0,24
EX	19,64	22,3	22,56	26,40	46,04	42,65
RH	9,99	22,3	36,31	116,95	126,94	7,87
ECO	100,09	22,3	30,06	156,04	256,13	39,08
MX1	0,09	22,3	45,16	66,24	66,33	0,14
F	0,48	34,3	37,88	6,87	7,35	6,53
WCC	10,13	11,4	16,79	1394,72	1404,85	0,72
DeNox	5,67	17,3	-	4,39	10,06	56,39
EV	100,04	17,3	27,31	1169,95	1269,99	7,88

Продовження таблиці 2.3

[Од. вимір.]	$Y_k$	$b_{f,k}$	$b_{p,k}$	$B_{D,k}$	$B_{D,k}+Y_k$	$f$
	[mPts/год]	[mPts/МДж]	[mPts/МДж]	[mPts/год]	[mPts/год]	[%]
Компоненти						
SH	69,41	17,3	18,58	33,59	103,00	67,39
WPH	76,49	17,3	37,34	191,20	267,69	28,57
HPT	1160,9	27,1	29,94	141,38	1302,27	89,14
LPT	1160,9	27,8	32,05	366,59	1527,48	76,00
CD	0,45	27,8	-	212,42	212,87	0,21
P1	2,47	34,3	42,49	0,18	2,65	93,04
MX2	0,05	27,1	75,20	10,84	10,89	0,46
P2	2,47	34,3	39,99	0,35	2,82	87,74
DEA	4,85	27,1	29,84	19,50	24,35	19,92
F1	5,67	17,3	-	17,15	22,82	24,85
F2	5,67	17,3	-	19,01	24,68	22,98
P3	2,47	34,3	39,37	2,55	5,02	49,18
DustC	6,79	17,3	-	20,52	27,31	24,87
G1	542,2	22,6	22,90	19,34	561,56	96,56
G2	1084,0	31,3	31,74	61,50	1145,50	94,63
MT1	1,26	29,1	34,26	0,15	1,41	89,67
MT2	2,48	29,1	34,26	0,37	2,85	87,14
MT3	22,48	29,1	34,26	2,98	25,46	88,29
MT4	83,5	29,1	34,26	10,91	94,42	88,45
ЗАГ	4492,0	12,7	32,93	3776,82	8268,85	54,32

Для обладнання, яке відноситься до “дисипативних” компонентів (dissipative components), а саме NOx очищувач, конденсатор, скрубери, пиловловлювачі ексергія “продукту” не розраховується.

Найбільший сумарний вплив від виробництва та експлуатації компонентів  $B_{D,k}+Y_k$  зображено на рисунку 2.3 має наступне обладнання: парові турбіни, випарник, котел для термічної утилізації відходів та газова камера згоряння.

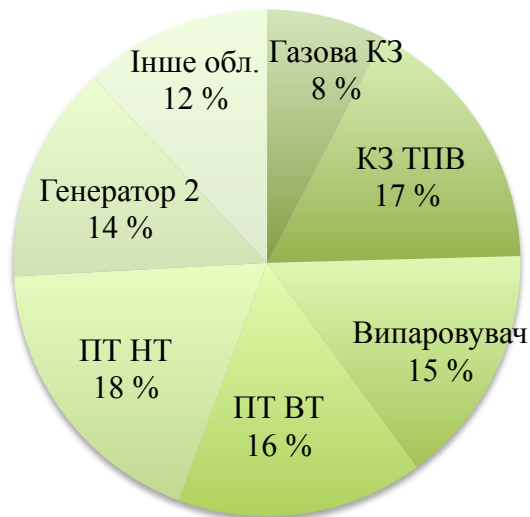


Рисунок 2.3 – Компоненти, що мають найбільший вплив на довкілля  $B_{D,k}+Y_k$

Випарник та котли здійснюють переважаючий вплив на довкілля через деструкцію ексергії, яка може бути зменшена шляхом покращення ефективності даного обладнання або зміни основних термодинамічних параметрів системи. Загальний вплив системи на довкілля складає 8268,85 (mPts/год), в якій більшу частку займає вплив від виробництва обладнання.

На рисунку 2.4 зображено види впливу на довкілля обладнання, що мають найбільші значення  $B_{D,k}+Y_k$ .



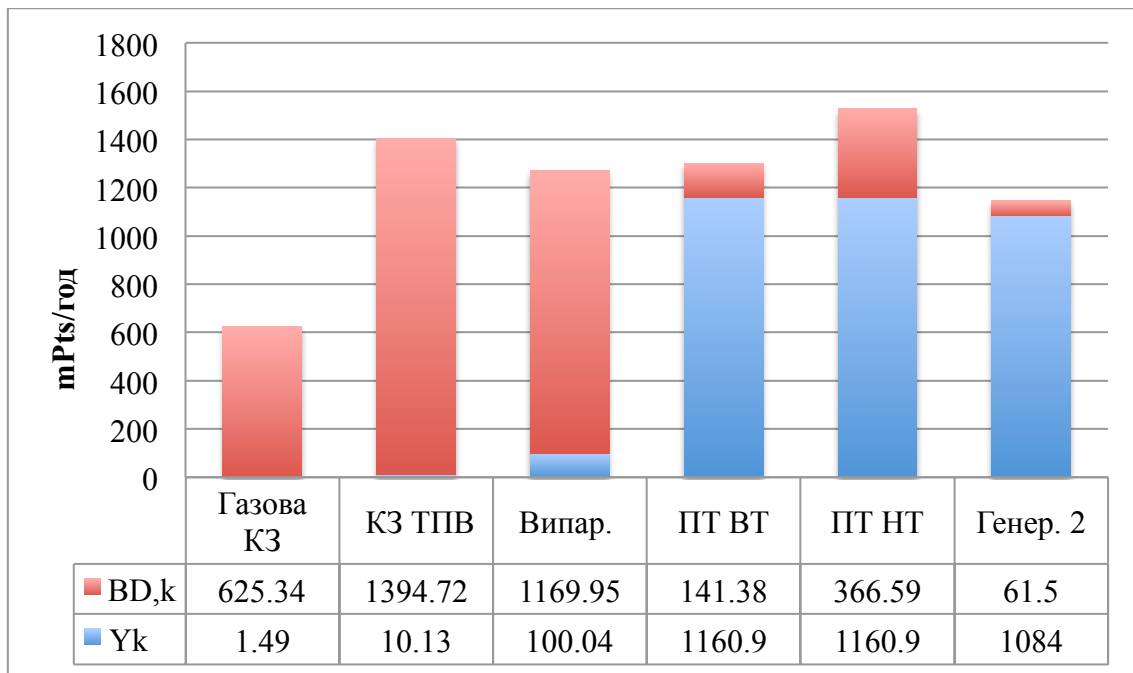


Рисунок 2.4 – Види впливу обладнання з найбільшими значеннями  $B_{D,k} + Y_k$

2.3 Оцінка ефективності застосування ексерго-екологічного методу з метою підвищення енергоефективності об'єктів теплоенергетики та зменшення навантаження на довкілля

Для покращення екологічних показників та зменшення впливу необхідно розуміти формування даного впливу на рівні компонентів системи.

Об'єктивне оцінювання та вдосконалення системи перетворення енергії з точки зору термодинаміки, економіки та впливу на навколишнє середовище вимагають глибокого розуміння реальних термодинамічних неефективностей та процесів, що їх викликали.

Запропонований метод екологічної оцінки показує два джерела впливу на довкілля, які пов'язані з термодинамічною неефективністю та життєвим циклом компонентів, а також потенціал для оптимізації системи.

На першому етапі проводиться детальний ексергетичний аналіз системи із застосуванням ексергетичних балансів. Наступним етапом є застосування методу оцінки впливу “Еко-індикатор 99” у поєднанні з методом оцінки життєвого циклу. Останнім кроком є врахування впливу пов'язаного з кожним компонентом системи до ексергетичних потоків.

Результати аналізу виявили обладнання, що потребує модернізації та параметри енергетичної системи, які можуть розглядатися, як об'єкт оптимізації. Основними параметрами системи для зменшення впливу на довкілля розглядалися наступні показники: зменшення різниці температур теплообмінників, підвищення внутрішнього відносного ККД експандера та зменшення температури вихідного потоку експандера. В результаті ефективність системи підвищилася на 1%, а загальний вплив системи на довкілля внаслідок зменшення деструкції ексергії зменшився на 129 [mPts/год].

Підвищення ефективності системи є обмеженим через використання ТПВ в якості основного палива для виробництва тепло- та електроенергії. На рисунку 2.5 зображено зміни концентрацій NO<sub>x</sub>, HCl, SO<sub>2</sub> та ККД системи при збільшенні витрати природного газу.

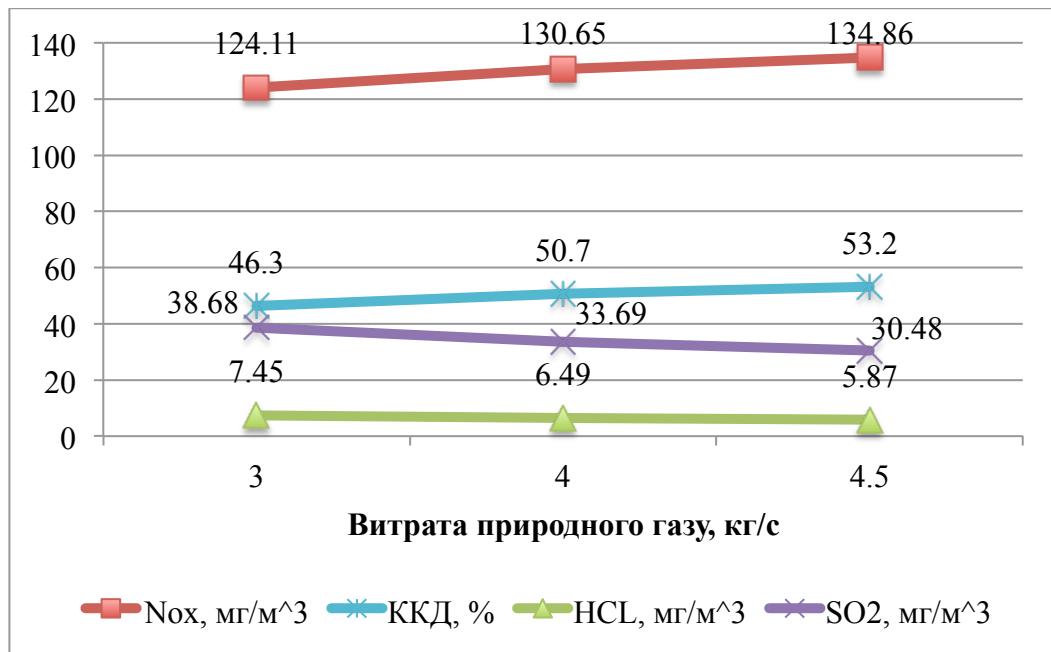


Рисунок 2.5 – Залежність концентрацій викидів та ККД системи від витрати природного газу

Отже, при збільшенні витрати природного газу та зменшенні частки утилізації ТПВ ефективність системи збільшується.

Використовуючи ексерго-екологічний метод ітеративної оптимізації на етапі проектування або для модернізації об'єктів можна забезпечити підвищення енергоефективності підприємств.

## Висновки до розділу 2

1. Виконана симуляція в програмному забезпеченні Ebsilon Profesional типової технологічної схеми теплоелектроцентралі, що працює на твердих

побутових відходах та природному газі з використанням сучасної концепції “WTE-GT cold windbox integration” для підвищення ефективності системи.

2. На прикладі запропонованої технологічної схеми проведено ексергетичний аналіз системи та визначені компоненти з найнижчою ефективністю, які потребують детального розгляду, а саме: теплообмінники та камера згоряння ТПВ.

3. Виконаний екологічний аналіз за методологією оцінки життєвого циклу продукту з використанням методології впровадження стійкого розвитку “Еко-індикатор 99”. Встановлений вплив на довкілля через виробництво, експлуатацію та утилізацію обладнання.

4. В результаті проведеного ексерго-екологічного аналізу для теплоелектроцентралі визначені основні елементи системи, що здійснюють найбільший вплив на навколишнє середовище, враховуючи весь життєвий цикл обладнання. Відповідно, серед таких компонентів є парові турбіни, котел для спалювання ТПВ та газова камера згоряння. Встановлено загальний ексерго-екологічний вплив системи на довкілля, що склав 8268,85 mPts/год.

5. Встановлено, що ефективність системи збільшиться на 6,9 % при збільшенні витрати газу з 3 кг/с до 4,5 кг/с, витрата ТПВ відповідно зменшиться на 8 кг/с.

### **3 ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ТЕЦ ЗА ДОПОМОГОЮ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЕКСЕРГО-ЕКОЛОГІЧНОГО АНАЛІЗУ**

3.1 Визначення технологічних параметрів за допомогою ексерго-екологічного аналізу, що здійснюють вплив на показники ресурсозбереження промислового об'єкта

Основним компонентом, що здійснює найбільший вплив на навколишнє середовище від ТЕС або ТЕЦ, що працюють на ТПВ є камера згоряння. За результатами апробації ексерго-екологічного аналізу встановлено, що вплив на довкілля через деструкцію ексергії від камери згоряння ТПВ складає 37 %, а разом з газовою камерою горіння 54 % від загальної деструкції системи.

Під час спалювання ТПВ в навколишнє середовище через факельне господарство потрапляє велика кількість викидів, в основному  $\text{CO}_2$  (діоксид вуглецю),  $\text{NO}_x$  (оксиди азоту),  $\text{NH}_3$  (аміак) та С (органічний вуглець). Концентрації діоксиду вуглецю складають найбільшу частку у відпрацьованих газах, в процесі спалювання 1 т ТПВ викидається 0,7–1,2 т  $\text{CO}_2$ . Оскільки ТПВ це неоднорідна суміш, розрізняють діоксид вуглецю біогенного (деревина) та техногенного походження (пластмаса). Згідно з літературними даними частка  $\text{CO}_2$ , що відноситься до техногенного

походження та впливає на зміну клімату складає від 33 % до 50 % від концентрації CO<sub>2</sub> [58].

Необхідно детально розглянути процес горіння ТПВ та встановити залежність кількості викидів, а саме CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HCl та SO<sub>2</sub> від хімічного складу палива внаслідок додавання різних хімічних елементів, для зменшення впливу на довкілля.

Існує необхідність у вдосконаленні процесів спалювання, яка зумовлена посиленням екологічних норм та зміною хімічного складу ТПВ. Гранично допустимі концентрації викидів відповідно до Директиви 2000/76/ЄС наведено в таблиці 3.1 [59].

Таблиця 3.1 – Гранично допустимі концентрації

Забруднювач	Гранично допустимі концентрації, мг/м <sup>3</sup>
NO <sub>x</sub>	200
SO <sub>2</sub>	50
HCl	10
HF	1
Загальний об'єм попелу	30

Кількість твердих побутових відходів на душу населення в деяких країнах з кожним роком зростає, в таблиці 3.2 наведено об'єми та тенденції збільшення обсягу ТПВ в країнах Європи за 20 років [60].

Таблиця 3.2 – Об'єми та тенденції збільшення обсягу ТПВ в Європі

Країни	Об'єми твердих побутових відходів (кг на людину в рік)			
	1995	2000	2004	2014
Бельгія	456	468	469	435
Німеччина	533	610	600	618
Франція	489	531	567	511
Італія	454	509	538	488
Угорщина	460	445	506	385
Фінляндія	414	503	455	482
Швеція	386	428	464	438
Великобританія	499	578	600	482
Туреччина	438	464	458	405
ЄС	487	563	577	475

З процесом урбанізації та розвитком технологій збільшується кількість синтетичних та полімерних відходів, а також небезпечних шкідливих речовин, що потребують спеціальної утилізації.

Для забезпечення екологічної безпеки під час спалювання ТПВ необхідно дотримуватися низки принципів. Підтримувати задану температуру та необхідну тривалість спалювання, які залежать від типу речовин; створювати турбулентні повітряні потоки, забезпечувати повноту спалювання відходів. У зв'язку з тим, що відходи різняться за широким діапазоном фізико-хімічних властивостей та джерелами утворення, існує безліч типів обладнання та технічних засобів для спалювання.

Наприклад, заміна окиснювача, що подається в камеру спалювання ТПВ, з повітря на кисень пришвидшить хімічні реакції, що забезпечить зниження концентрації викидів та змінить їх склад, особливо суттєво зменшить кількість викидів  $\text{NO}_x$ . Також до сучасних технологій утилізації можна віднести спалювання сміття у псевдозрідженому шарі в присутності піску, доломітової крошки або абсорбенту. З використанням цієї технології відбувається підвищення хімічної повноти згоряння при мінімальному утворенні шкідливих речовин [61]. В таблиці 3.3 наведені хімічні реакції процесу горіння.

Таблиця 3.3 – Хімічні реакції процесу горіння

Хімічні елементи	Хімічне рівняння
Вуглець	$\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$
Водень	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$
Сульфур	$\text{S} + \text{O}_2 = \text{SO}_2$
Монооксид вуглецю	$2\text{CO} + \text{O}_2 = 2\text{CO}_2$
Азот	$\text{N}_2 + \text{O}_2 = \text{NO}$
Азот	$\text{N}_2 + 2\text{O}_2 = 2\text{NO}_2$
Азот	$\text{N}_2 + 3\text{O}_2 = 2\text{NO}_3$
Хлор	$4\text{Cl} + 2\text{H}_2\text{O} = 4\text{HCl} + \text{O}_2$



### 3.2 Встановлення закономірностей зміни кількості викидів від технологічних параметрів

Для зменшення кількості викидів в процесі термічної утилізації ТПВ розглядається можливість подачі води до камери згоряння, ступеневе спалювання та подача метанолу безпосередньо в камеру горіння. Для встановлення відповідних залежностей використано симуляцію ТЕЦ, описану в другому розділі магістерської дисертації.

Додавання води до паливоповітряної суміші збільшує її теплоємність. Тому загальний рівень температури значно знижується за умови використання такої ж кількості палива. В таблиці 3.4 наведено дані концентрацій викидів за умови подачі води до камери горіння ТПВ та вплив на загальний ККД системи.

Таблиця 3.4 – Концентрації викидів та ККД системи за умови різної подачі води до камери горіння

Кількість води (1)	CO <sub>2</sub> , мг/м <sup>3</sup>	NO <sub>x</sub> , мг/м <sup>3</sup>	HCl, мг/м <sup>3</sup>	SO <sub>2</sub> , мг/м <sup>3</sup>	Ефективність системи, %
0 %	249251	125,34	8,26	32,1	47,4
0,1 %	249387	125,41	8,202	31,8	47,4
1 %	251687	126,15	8,18	29,1	47,4
2 %	250297	126,41	8,03	26,02	47,2
Примітка: (1) – частка від витрати палива					

Відповідно за умови додавання 2 % H<sub>2</sub>O від загальної витрати палива концентрація SO<sub>2</sub> зменшиться на 19 %, HCl – на 3 %. Проте, як видно з

таблиці 3.3, є і негативні зміни. Такі як, збільшення концентрацій викидів вуглекислого газу та оксидів азоту, а також зменшення ефективності системи на 0,2 %. За умови подальшого збільшення частки води іншими негативними наслідками є неповнота згоряння, зменшення температури вихідних газів та ККД системи на 4–5 %. Аналіз таблиці показав, що найбільш доцільним є використання ТПВ з подачею до камери згоряння 2 % води.

Наступним етапом встановлена залежність зменшення концентрації  $\text{NO}_x$  та  $\text{CO}_2$  від зміни процесу на ступеневе спалювання з подачею 2% води від витрати палива. На рисунку 3.1 наведено залежність утворення кількості викидів вуглекислого газу та оксидів азоту від додаткової витрати повітря в камері згоряння.

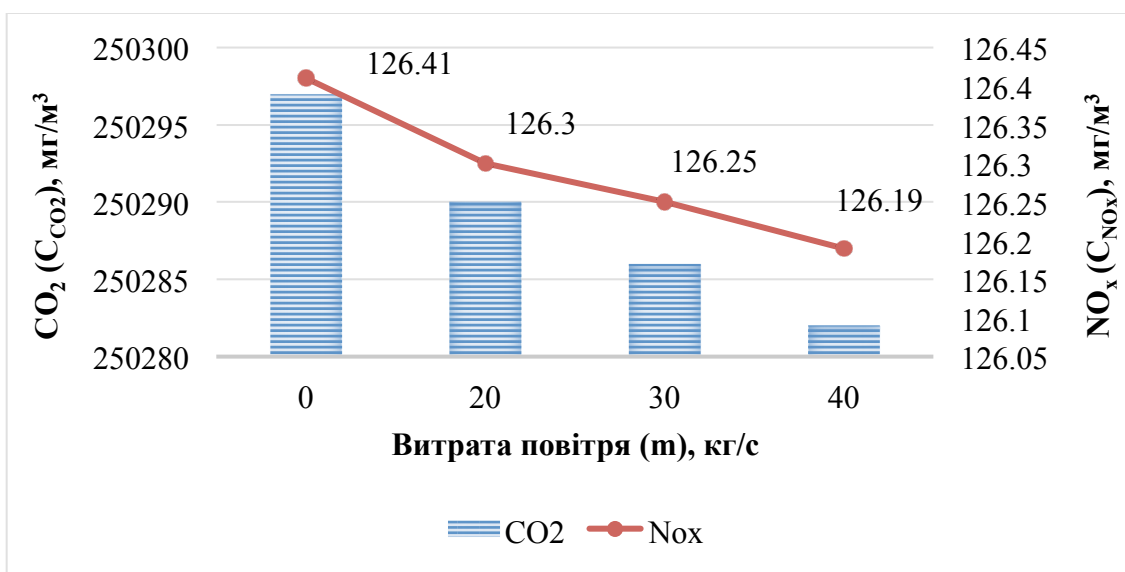


Рисунок 3.1 – Залежність концентрації викидів ( $\text{CO}_2$  та  $\text{NO}_x$ ) від ступеневого спалювання (ТПВ + 2 %  $\text{H}_2\text{O}$ )

Наведено поліноміальне рівняння другого ступеню, що описує залежність концентрації  $\text{CO}_2$  від витрати повітря:

$$C_{\text{CO}_2} = 0,75 \cdot m^2 - 8,65 \cdot m + 250305,$$

де  $m$  – витрата повітря, кг/с;

$C_{\text{CO}_2}$  – концентрація викидів  $\text{CO}_2$ , мг/м<sup>3</sup>.

За допомогою лінійного рівняння описана залежність концентрації  $\text{NO}_x$  від зміни витрати повітря:

$$C_{\text{NO}_x} = -0,071 \cdot m + 126,47,$$

де  $m$  – витрата повітря, кг/с;

$C_{\text{NO}_x}$  – концентрація викидів  $\text{NO}_x$ , мг/м<sup>3</sup>.

Під час додавання повітря в камеру згоряння для ступеневого спалювання концентрація викидів вуглекислого газу та оксидів азоту поступово зменшується зі збільшенням витрати повітря, а концентрації хлористого водню та діоксиду сірки не змінюються. Крім цього, спостерігається незначне підвищення ефективності системи на 0,1 %.

Для ефективного зменшення викидів пропонується додавати метанол безпосередньо до камери згоряння ТПВ. Використовуючи отримані

залежності, розглядається суміш, що містить додатково 2 %  $\text{H}_2\text{O}$  та 2 %  $\text{CH}_3\text{OH}$  від частки палива. На рисунку 3.2 наведено результати викидів попередньо описаної суміші за умови подачі різної кількості повітря.

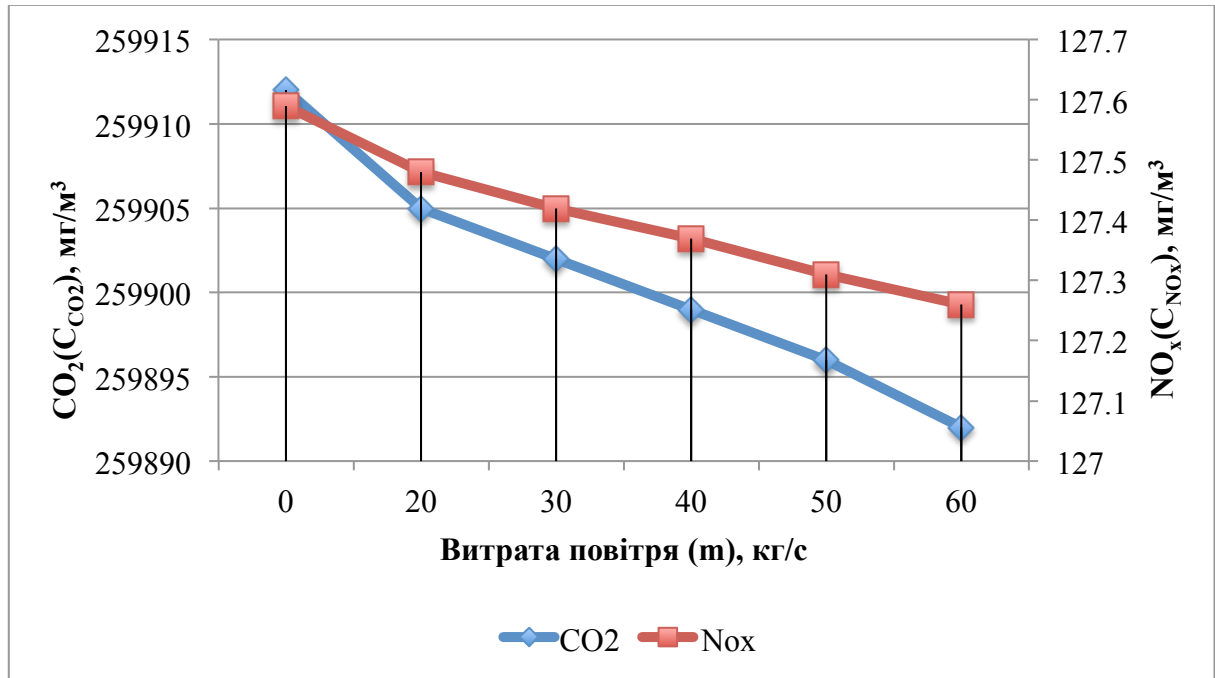


Рисунок 3.2 – Залежність концентрації викидів ( $\text{CO}_2$  та  $\text{NO}_x$ ) від ступеневого спалювання (ТПВ + 2 %  $\text{H}_2\text{O}$  + 2 %  $\text{CH}_3\text{OH}$ )

Залежності описані поліноміальними рівняннями третього ступеня:

$$C_{\text{CO}_2} = -0,2315 \cdot m^3 + 2,6984 \cdot m^2 - 12,927 \cdot m + 259922,$$

$$C_{\text{NO}_x} = -0,0024 \cdot m^3 + 0,0306 \cdot m^2 - 0,177 \cdot m + 127,74,$$

де  $m$  – витрата повітря, кг/с;

$C_{\text{CO}_2}$  – концентрація викидів  $\text{CO}_2$ , мг/м³;

$C_{\text{NO}_x}$  – концентрація викидів  $\text{NO}_x$ , мг/м³.

З додаванням метанолу до камери згоряння ТПВ концентрації  $\text{CO}_2$  та  $\text{NO}_x$  збільшилися на 4 % та 0,7 % відповідно. Проте, встановлені значні зменшення токсичних викидів  $\text{SO}_2$  на 9 % та викидів  $\text{HCl}$  – на 18 %. Встановлена попередньо тенденція зміни концентрацій  $\text{CO}_2$  та  $\text{NO}_x$  зі збільшенням витрати повітря залишається незмінною при додаванні метанолу.

В таблиці 3.5 наведено результати проведеного дослідження зі збільшенням кількості метанолу до 10 % в камері згоряння при різних технологічних умовах системи. Чи потрібно залишати воду

Таблиця 3.5 – Концентрації викидів та ККД системи

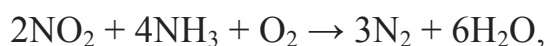
Технологічні умови	$\text{CO}_2$ , мг/м <sup>3</sup>	$\text{NO}_x$ , мг/м <sup>3</sup>	$\text{HCl}$ , мг/м <sup>3</sup>	$\text{SO}_2$ , мг/м <sup>3</sup>	Ефективність системи, %
2% $\text{H}_2\text{O}$ + 30 кг/с розхід повітря + 10% метанолу в камері згоряння	239580	124,05	4,3	17,9	47,4
Різниця з початковими даними*	9671	1,29	3,96	14,2	-
30 кг/с повітря + 10% метанолу в камері згоряння	229468	121,23	3,9	16,55	47,4
Різниця з початковими даними*	19783	4,11	4,36	15,55	-
Примітка: (*) – ТПВ без вприскування води, додаткової витрати повітря та додавання метанолу.					

Отже, при додаванні метанолу до камери згоряння та змінивши процес на ступеневе спалювання сума концентрацій хімічних речовин, що

розглядаються зменшилися на 8 %. Також метанол є ефективним засобом для охолодження камери згоряння, що збільшує термін експлуатації. Зменшення концентрацій пояснюються більш рівномірним горінням ТПВ.

Використання метанолу на підприємствах з утилізації ТПВ для процесів очищення значно зменшує викиди в довкілля та покращує екологічну ситуацію, не впливаючи на ефективність системи.

Одним із елементів системи є очищення відпрацьованих газів з використанням технології селективного каталітичного відновлення, яка полягає в змішуванні аміаку з газами та використанні каталізатора для перетворення оксидів азоту в азот та воду. В ролі каталізаторів використовують оксиди основних металів, наприклад, ванадій, молібден та вольфрам. Хімічні рівняння при стехіометричній реакції наступні:



На рисунку 3.3 наведено результати використання частки метанолу в суміші з аміаком при спалюванні ТПВ з вприскуванням 2 % води та 2 % метанолу в камеру згоряння, а також з додатковою витратою повітря 30 кг/с.

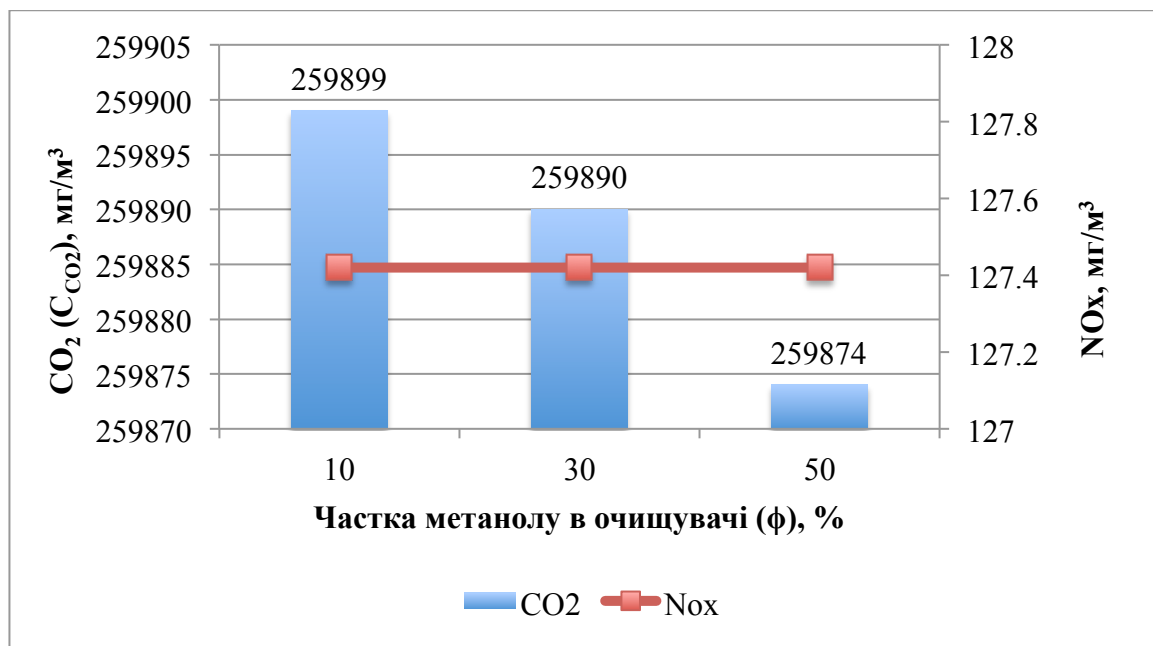


Рисунок 3.3 – Залежність концентрації викидів (CO<sub>2</sub> та NO<sub>x</sub>) від частки метанолу в очищувачі (ТПВ + 2 % H<sub>2</sub>O + 2 % CH<sub>3</sub>OH)

Нижче наведено поліноміальне рівняння другого ступеня, що описує залежність концентрації CO<sub>2</sub> від частки метанолу в суміші з амонієм:

$$C_{CO_2} = -3,5 * \phi^2 + 1,5 * \phi + 259901,$$

де  $\phi$  – частка метанолу в очищувачі, %;

$C_{CO_2}$  – концентрація викидів CO<sub>2</sub>, мг/м³.

Результати використання суміші аміак-метанол в очищувачі не показали значних покращень, концентрації газів не змінилися, крім оксидів вуглецю.

В таблиці 3.6 наведено результати використання метанолу в різних кількостях та етапах технологічного процесу.

Таблиця 3.6 – Концентрації викидів та ККД системи при різних технологічних умовах

Технологічні умови	CO <sub>2</sub> , мг/м <sup>3</sup>	NO <sub>x</sub> , мг/м <sup>3</sup>	HCl, мг/м <sup>3</sup>	SO <sub>2</sub> , мг/м <sup>3</sup>	Ефективність системи, %
2% H <sub>2</sub> O + 30 кг/с повітря + 2% метанолу в камері згоряння	259902	127,42	6,63	23,73	47,3
30 кг/с повітря + 10% метанолу в камері згоряння	229468	121,23	3,9	16,55	47,4
30 кг/с повітря + 10% метанолу в камері згоряння + 50% метанолу в очищувачі	229444	121,23	3,97	16,55	47,4
2% H <sub>2</sub> O + 30 кг/с повітря + 50% метанолу в очищувачі	250259	126,25	8,03	26,02	47,3

Додавання метанолу до камери згоряння впливає найбільше на зменшення концентрацій викидів серед інших параметрів, що розглядалися. Тому, досліджувався еколого-економічний ефект використання метанолу в камері згоряння ТПВ, результати наведені на рисунку 3.4. Еколого-економічний ефект розраховувався за наступною формулою:

$$\text{Ефект} = \text{Продаж електроенергії} - \text{Вартість метанолу} - \text{Екологічний податок},$$



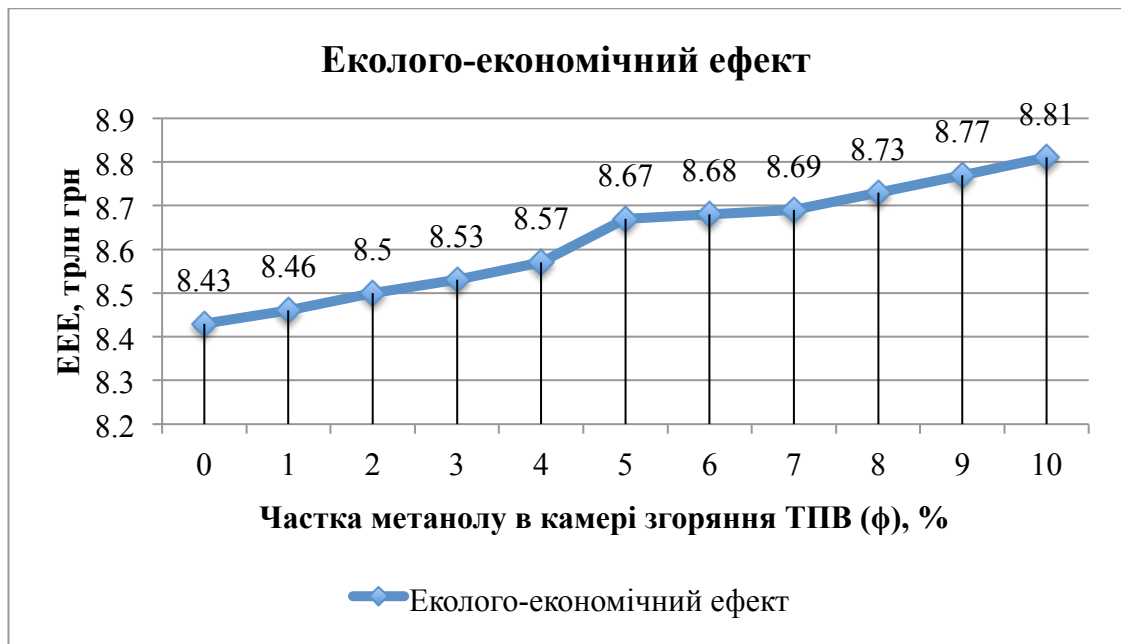


Рисунок 3.4 – Еколого-економічний ефект від використання метанолу в камері згоряння ТПВ

Еколого-економічний ефект описується лінійним рівнянням:

$$EEE = 0,0387 * \phi + 8,3895,$$

де  $\phi$  – частка метанолу в камері згоряння, %;

EEE – еколого-економічний ефект, трлн грн.

В результаті дослідження встановлено, що еколого-економічний ефект зростає зі збільшенням частки метанолу в камері згоряння ТПВ. Проте, подальше збільшення частки метанолу ( $> 10\%$ ) потребує збільшення витрати повітря для обмеження температури відхідних газів, яке знаходиться в межах

900-1100°C для уникнення корозії в котлі, тому є недоцільним. При подальшому збільшенні частки метанолу потрібно зменшувати витрату ТПВ.

Одним із найважливіших циклів теплоелектроцентралі, що працює на природному газі є газотурбінна система, зміна деяких параметрів якої, наприклад, ступінь стиснення в компресорі, внутрішній відносний ККД газової турбіни, впливає на концентрації викидів. Наведено залежності концентрації викидів від коефіцієнта надлишку повітря в газовій камері спалювання на рисунках 3.5 та 3.6.

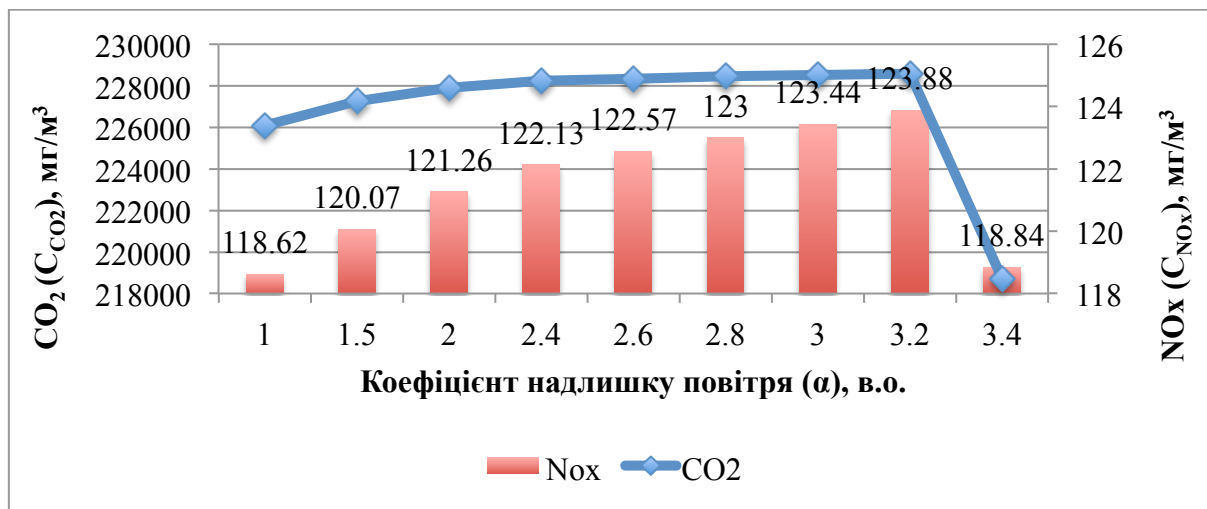


Рисунок 3.5 – Залежність концентрації викидів (CO<sub>2</sub> та NO<sub>x</sub>) від коефіцієнта надлишку повітря

Залежності описуються поліноміальними рівняннями шостого ступеню:

$$C_{CO_2} = -3,5939 \cdot \alpha^6 + 95,078 \cdot \alpha^5 - 984,95 \cdot \alpha^4 + 5073 \cdot \alpha^3 - 3669 \cdot \alpha^2 + 18769 \cdot \alpha + 216815,$$

$$C_{NOx} = -0,0019*\alpha^6 + 0,0482*\alpha^5 - 0,4822*\alpha^4 + 2,3737*\alpha^3 - 6,1443*\alpha^2 + 9,1511*\alpha + 113,67,$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт надлишку повітря, в.о.;

$C_{CO_2}$  – концентрація викидів  $CO_2$ , мг/м<sup>3</sup>;

$C_{NOx}$  – концентрація викидів  $NO_x$ , мг/м<sup>3</sup>.

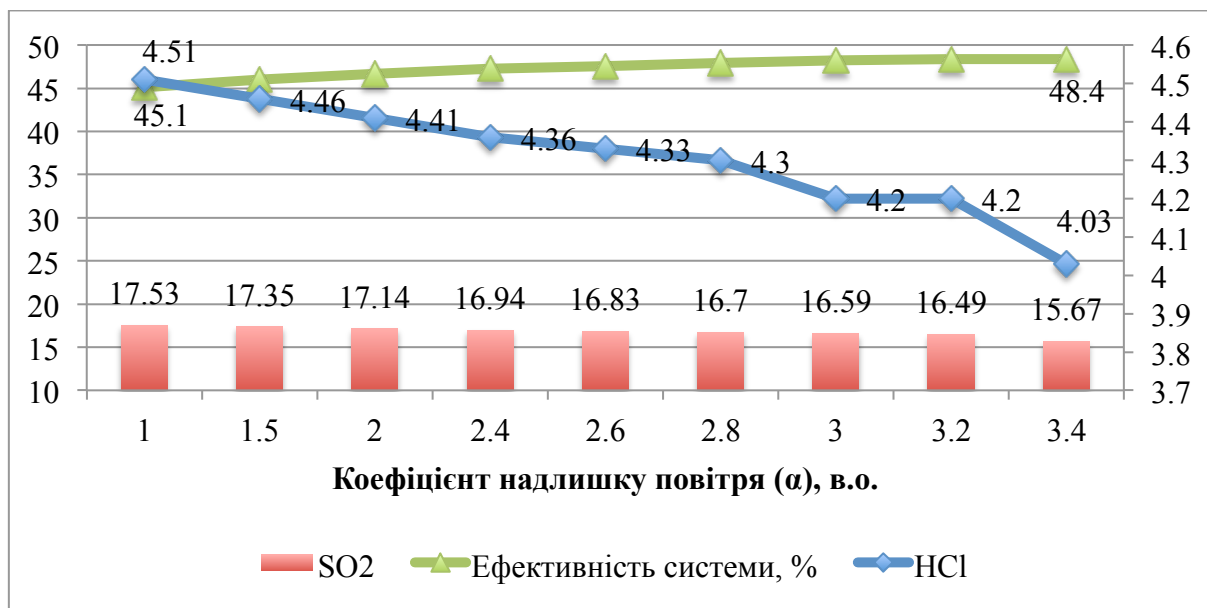


Рисунок 3.6 – Залежність концентрації викидів ( $SO_2$  та  $HCl$ ) від коефіцієнта надлишку повітря

Залежність концентрації  $SO_2$  від коефіцієнта надлишку повітря описується поліноміальним рівнянням четвертого ступеня:

$$C_{SO_2} = -0,0003*\alpha^4 + 0,0052*\alpha^3 - 0,0266*\alpha^2 + 0,0029*\alpha + 4,5272,$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт надлишку повітря, в.о.;

$C_{SO_2}$  – концентрація викидів  $SO_2$ ,  $mg/m^3$ .

Використання бідної робочої суміші призводить до зниження температури процесу горіння та є одним із методів зменшення викидів оксидів азоту. Також, збільшується загальна ефективність системи. Концентрація  $NO_x$  зростає при використанні коефіцієнта надлишку повітря в газовій камері згоряння від 1 до 3,2, що пояснюється збільшенням витрати повітря, яке складається з 78,1%  $N_2$  тому переважає механізм утворення органічного NO. При подальшому збільшенні витрати повітря температура в камері згоряння значно знижується, тому кількість термічного NO, що залежить від температури, суттєво зменшується.

### 3.3 Використання синтетичних цеолітів для очищення відхідних газів від діоксидів сірки

Ефективне зниження вмісту  $SO_2$  у газах, що утворюються при спалюванні в котлах, печах та двигунах є однією з найважливіших екологічних проблем. Видалення  $SO_2$  процесом адсорбції є потенційною альтернативою традиційним технологіям на основі мокрого або сухого очищення. Останні є технологіями з високими експлуатаційними витратами та мають низьку ефективність поглинання  $SO_2$ .

Процеси адсорбції можуть відбуватися з високим ступенем поглинання, але потребують значних кількостей адсорбенту, а також регенерація адсорбенту є досить енерговитратною. Ці проблеми можуть бути вирішені з використанням адсорбуючого матеріалу з високою адсорбційною здатністю поглинання  $\text{SO}_2$ .

Головною характеристикою адсорбенту, є його адсорбційна ємність, із врахуванням якої можна розрахувати необхідну кількість адсорбенту для поглинання того чи іншого викиду. Масу адсорбованого оксиду сірки можна визначити за формулою [62, 63]:

$$m_{ad} = \frac{FP_0M_{SO_2}}{RT_k} \int_{t_{tot}}^{t_H} \Delta C dt ,$$

де  $t_{tot} = \frac{V_{tot} \cdot P_{ads} \cdot T_k}{F \cdot P_0 \cdot T_{ads}}$  – час простою , год;

$t_H$  – час насичення адсорбенту, год;

$F$  – витрата газу,  $\text{м}^3/\text{год}$ ;

$M_{SO_2}$  – молярна маса,  $\text{г/моль}$ ;

$T_k$  – температура навколишнього середовища,  $\text{К}$ ;

$T_{ads}$  – температура адсорбенту,  $\text{К}$ ;

$\Delta C$  – зміна концентрації,  $\text{мол.}\%$ ;

$V_{tot}$  – об'єм апаратури,  $\text{м}^3$ ;

$P_0, P_{ads}$  – нормальний тиск і тиск на адсорбенті,  $\text{Па}$ .

Відповідно до розміру молекул одним із адсорбентів, що може поглинати  $\text{SO}_2$  (0,143 нм) [64] є синтетичний цеоліт 13X. Користуючись експериментальними даними приведеними в роботі [65] 1 г синтетичного цеоліту 13X поглинає 0,35 г  $\text{SO}_2$  або 0,133 дм<sup>3</sup>. Для поглинання діоксиду сірки з концентрацією 16,55 мг/м<sup>3</sup> та об'ємною витратою газу 326,3 м<sup>3</sup>/с необхідно 15,5 г/с цеоліту. Враховуючи, що експериментальні дані, щодо поглинання маси газу проводилися при температурі 298-303 К, а температура відхідних газів знаходиться в діапазоні 408-418 К, пропонується збільшити масу цеоліту у два рази через погіршення адсорбційної здатності цеолітів при підвищенні температури газів, тобто 31 г/с.

### Висновки до розділу 3

1. Визначено можливості зменшення концентрацій викидів зі зміною хімічного складу палива внаслідок вприскування води, використання метанолу як добавки до ТПВ та впровадження процесу ступеневого спалювання з додатковою витратою повітря.

2. Встановлено залежності концентрацій вуглекислого газу та оксидів азоту від кількості метанолу у камері згоряння ТПВ. Визначено, що при подачі води до камери згоряння концентрація  $\text{SO}_2$  значно зменшується, при вприскуванні 2 %  $\text{H}_2\text{O}$  від масової частки палива викиди діоксиду сірки скорочуються на 19 %.

3. Обґрунтовано, що ефективним методом для зменшення викидів діоксиду вуглецю та оксидів азоту є підвищення коефіцієнта надлишку повітря з використанням технології ступеневого спалювання. Зокрема, встановлено залежності концентрацій вуглекислого газу та оксидів азоту від кількості метанолу у камері згоряння ТПВ.

4. Виявлено, що при додаванні метанолу до камери згоряння ТПВ спостерігається більш рівномірне горіння, що призводить до зменшення всіх викидів та підвищення ефективності роботи системи. Встановлено, що найкращими технологічними умовами є додаткова витрата повітря та використання метанолу як добавки до ТПВ.

5. Встановлено, що еколого-економічний ефект при додаванні  $\text{CH}_3\text{OH}$  зростає, тому запропоновано використання 10 % метанолу від частки витрати ТПВ. При додаванні  $> 10 \%$  метанолу необхідно зменшувати витрату ТПВ для правильної експлуатації котла.

## 4 СТАРТАП - ПРОЕКТ

### 4.1 Опис ідеї проекту

Ідеєю стартап-проекту є впровадження ексерго-екологічного аналізу на етапі проектування та модернізації підприємств теплоенергетики. Об'єктами практичної реалізації методу є не тільки замкнуті системи перетворення енергії і речовини, в яких енергетичний баланс включає теплоту і роботу, а й відкриті технічні системи.

На даний момент ексергетичний аналіз є найбільш ефективним щодо визначення шляхів скорочення втрат від незворотності та впливу системи на навколишнє середовище. В таблиці 4.1 наводиться опис ідеї стартап-проекту.

Таблиця 4.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Опис ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Впровадження методу ексерго-екологічного аналізу на підприємствах теплоенергетики	1. Використання на етапі проектування підприємств. 2. Використання для оптимізації підприємств відповідно до термодинамічних та екологічних показників. 3. Використання як частини екологічного аудиту.	1. Повнота даних. 2. Точність. 3. Зменшення енергетичних втрат. 4. Ефективна експлуатація. 5. Ресурсозбереження. 6. Знаходження оптимуму між технологічними та екологічними показниками. 7. Можливості для оптимізації.



## 4.2 Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї

В таблиці 4.2 визначено перелік сильних (S), слабких (W) та нейтральних (N) характеристик запропонованої ідеї для формування поняття про її конкурентоспроможність [66].

Таблиця 4.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко- економічні характерист ики ідеї	Концепції конкурентів			Сильна сторона (S)	Слабка сторона (W)	Нейтральна сторона (N)
		Мій проект	Конкурент 1 Екологічний моніторинг	Конкурент 2 Екологічний аудит			
1.	Точність	5	5	5	+		
2.	Доступність	4	4	2			+
3.	Швидкість	5	4	3	+		
4.	Витрати	5	4	5	+		
5.	Ємність	5	5	5	+		

В результаті проведеного аналізу, запропонована методика має найбільші конкурентні переваги, в якій відсутні слабкі сторони. Нейтральною стороною є доступність методики, що пояснюється недостатністю кваліфікованих спеціалістів, що можуть включити ексерго-екологічний аналіз в існуючі методи моделювання, аналізу та оптимізації.

### 4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Для визначення потенційних ринкових загроз необхідно провести аналіз ринкового середовища серед потенційних споживачів та конкурентів.

В таблиці 4.3 наведена характеристика потенційних клієнтів.

Таблиця 4.3 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проєкту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1.	Підвищення ефективності	Підприємства теплоенергетичної галузі	Нова енергетична стратегія України до 2035 року: “Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність”	Забезпечення потреб виробництва
2.	Відповідність європейським стандартам	Підприємства різних галузей	Європейське енергетичне співтовариство, ISO 50001	Ефективна та безпечна експлуатація
3.	Екологізація	Підприємства різних галузей	Стратегія сталого розвитку України до 2030 року, ISO 14040	Збереження навколишнього середовища та здоров’я населення

Виходячи з характеристики ринку та середовища запропонована ідея стартапу є актуальною особливо для підприємств теплоенергетики, так як враховує крім екологічної складової також термодинамічну. Впровадження

даного методу дозволить оптимізувати об'єкти, враховуючи вплив на довкілля.

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є проведення SWOT-аналізу (таблиця 4.4).

Таблиця 4.4 – SWOT-аналіз стартап-проєкту

<b>Сильні сторони:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• точність</li> <li>• швидкість проведення</li> <li>• ціна</li> <li>• екологічність</li> <li>• наукова та експериментальна обґрунтованість</li> </ul>	<b>Слабкі сторони:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• суб'єктивність</li> <li>• доступність</li> </ul>
<b>Можливості:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• експериментальні дослідження</li> <li>• вдосконалення</li> <li>• оптимізація системи</li> <li>• підвищення енергоефективності</li> <li>• ресурсозбереження</li> </ul>	<b>Загрози:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• кваліфіковані кадри</li> <li>• конкуренція</li> </ul>

На основі SWOT-аналізу перспективи виходу стартап-проєкту на ринок з огляду на критерії конкурентного середовища наведені в таблиці 4.5

Таблиця 4.5 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проєкту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Поширення комерційних пропозицій серед цільової аудиторії	середня	1-3 роки

## Продовження таблиці 4.5

2	Відкриття курсів для підготовки кваліфікованих кадрів по впровадженню ексерго-екологічного аналізу	висока	1 рік
3	Компенсувати сильними сторонами загрози проекту	висока	1 рік

Короткі строки реалізації можливі при відкритті навчальних курсів по впровадженню ексерго-екологічного методу на підприємствах.

## Висновки до розділу 4

1. Розроблений стартап-проект має значні переваги на ринку, такі як швидкість проведення аналізу, тому складе попит серед підприємств-споживачів. Найголовнішою перевагою є можливість знаходження оптимуму системи серед технологічних та екологічних показників.

2. Визначено конкурентне середовище ринку, яке представлено наступними методиками: екологічним моніторингом та екологічним аудитом. Проте, діючі методики потребують великої кількості витрат та часу.

3. Цільовою групою стартап-проекту передусім є підприємства теплоенергетики, що потребують модернізації, а також електростанції на етапі планування. Крім цього, запропонований метод може ефективно використовуватися для визначення впливу хімічних підприємств.

4. Запропонована ідея стартап-проекту має конкурентні переваги, а також попит на ринку. Можна стверджувати, що існує потенціал для комерційної реалізації даного продукту.

## ВИСНОВКИ

1. Виконана симуляція в програмному забезпеченні Ebsilon Profesional типової технологічної схеми теплоелектроцентралі, що працює на твердих побутових відходах та природному газі з використанням сучасної концепції “WTE-GT cold windbox integration” для підвищення ефективності системи.

2. На прикладі запропонованої технологічної схеми проведено ексергетичний аналіз системи, екологічний аналіз за методологією оцінки життєвого циклу продукту з використанням методології “Еко-індикатор 99”.

3. В результаті проведеного ексерго-екологічного аналізу для теплоелектроцентралі визначені основні елементи системи, що здійснюють найбільший вплив на навколишнє середовище, враховуючи весь життєвий цикл обладнання, а саме парові турбіни, котел для спалювання ТПВ та газова камера згоряння. Встановлено загальний ексерго-екологічний вплив системи на довкілля, що склав 8268,85 mPts/год.

4. Встановлено, що ефективність системи збільшиться на 6,9 % при збільшенні витрати газу з 3 кг/с до 4,5 кг/с, витрата ТПВ відповідно зменшиться на 8 кг/с.

5. Визначені залежності зменшення концентрації викидів від зміни хімічного складу палива внаслідок вприскування води, використання метанолу як добавки до ТПВ та процесу ступеневого спалювання з додатковою витратою повітря.

6. Встановлено, що при подачі води до камери згоряння концентрація  $\text{SO}_2$  значно зменшується, при вприскуванні 2 %  $\text{H}_2\text{O}$  від масової частки палива викиди діоксиду сірки скорочуються на 19 %.

7. Визначено ефективним методом для зменшення викидів діоксиду вуглецю та оксидів азоту підвищувати коефіцієнт надлишку повітря з використанням технології ступеневого спалювання. Отримані залежності описані поліноміальним та лінійним рівняннями.

8. Виявлено, що при додаванні метанолу до камери згоряння ТПВ спостерігається більш рівномірне горіння, що призводить до зменшення всіх викидів та підвищення ефективності роботи системи. Встановлено, що найкращими технологічними умовами є додаткова витрата повітря та використання метанолу як добавки до ТПВ. В результаті проведених досліджень встановлено зменшення концентрації хлористого водню на 53 % та діоксиду сірки на 48 %.

9. Встановлено, що еколого-економічний ефект при додаванні  $\text{CH}_3\text{OH}$  зростає, тому запропоновано використання 10 % метанолу від частки витрати ТПВ. При додаванні  $> 10$  % метанолу необхідно зменшувати витрату ТПВ для безпечної експлуатації котла.

10. Запропоновано використання цеоліту 13X для очищення відхідних газів від діоксиду сірки та розраховано необхідну масу цеоліту, враховуючи розмір молекул газу, яка становить 31 г/с.

11. Розроблено стартап-проект впровадження методу ексерго-екологічного аналізу для підприємств теплоенергетики. Проаналізовано перспективи стартап-проекту та можливості існування на ринку.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року: Закон України від 28 лютого 2019 р. № 2697 – VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19> (дата звернення: 08.03.2019).
2. Про стратегія сталого розвитку України до 2030 року: Закон України від 7 серпня 2018 р. № 9015. URL: [http://search.ligazakon.ua/l\\_doc2.nsf/link1/JH6YF00A.html](http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/JH6YF00A.html) (дата звернення: 10.03.2019).
3. Про оцінку впливу на довкілля: Закон України від 23 травня 2017 р. № 2059 – VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19> (дата звернення: 08.03.2019).
4. Про екологічну експертизу: Закон України втратив чинність від 18 грудня 2017 р. підстава № № 2059 – VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/45/95-вр> (дата звернення: 08.03.2019).
5. Щодо затвердження ДБН А.2.2-1-2003 “Склад і зміст матеріалів оцінки впливів на навколишнє середовище (ОВНС) при проектуванні і будівництві підприємств, будинків і споруд. Основні положення проектування”: Наказ від 15 грудня 2003 р. №214. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0214509-03> (дата звернення: 08.03.2019).
6. Караєва Н. В., Гончаренко В. В. Інформаційна система підтримки заходів забезпечення екологічної безпеки. *Наука молода*. 2008. № 10. С. 24-32.

7. Економічна оцінка збитків від забруднення довкілля. НТУУ «КПІ»  
URL: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/11474> (дата звернення: 01.04.2019).
8. Ерофеев В.Л., Семенов П.Д., Пряхин А.С. Теплотехника: Учебник для вузов. Москва: Академкнига, 2006. 488с.
9. Клименко В.М., Ландау Ю.О., Сігал І. Енергетика: історія, сучасність і майбутнє. Розвиток теплоенергетики та гідроенергетики. Київ, 2011. 400 с.
10. Борисов М.А. Реабілітація ТЕС. Забезпечення сталої роботи об'єднаної енергосистеми України. *Енергетика и электрификация*. 2004. № 3. С. 2–3.
11. Энергетические установки и окружающая среда / под ред. В.А. Маляренко. Харьков: ХГФГХ, 2002. 397 с.
12. ISO 14040:2006 Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework [Чинний від 2006-07-01]. Швейцарія, 2006. 26 с.
13. Зелена книга. Зменшення шкідливих викидів у тепловий електроенергетиці України через виконання вимог Європейського енергетичного співтовариства. – Київ: Міжнародний центр перспективних досліджень, 2011. – 43 с.
14. Варламов Г.Б., Капустянський А.О. Вплив характеристик непроектного твердого палива на показники надійності та економічності роботи котельного устаткування. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2018. №1. С. 90 – 98.

15. Ковалев А.О. Методы оценки экологического воздействия на городскую среду. *Международный научный журнал “Символ Науки”*. №11. 2016.
16. Козуля Т.В., Шаронова Н.В., Смелянова Д.И., Козуля М.М. Інформаційно-методичне забезпечення комплексної оцінки екологічності системних об’єктів. *Системні дослідження та інформаційні технології*. 2014. № 3. С. 25-34.
17. Ayfer Bartan, Serhat Kucukali, Irfan Ar. Environmental impact assessment of coal power plants in operation. *E3S Web of Conferences*. 2017. Vol. 22. 8 p.
18. Sundara K. Environmental impact assessment of a proposed thermal power plant using rapid impact assessment matrix method. *International journal of applied environmental sciences*. 2010. С. 669-682.
19. Kwabena Kankam-Yeboah. Rapid impact assessment matrix (RIAM) - An analytical tool in the prioritization of water resources management problems in Ghana. *ResearchGate*. 2005.
20. Tolga Balta M., Kalinci Y., Hepbasli A. Evaluating a low exergy heating system from the power plant through the heat pump to the building envelope. *Energy & Buildings*. 2008. V. 40. P. 141–147.
21. Favrat D., Marechal F., Epelly O. The challenge of introducing an exergy indicator in a local law on energy. *Energy*. 2008. V. 38. P.130–136.

22. Тсатсаронис Дж. Взаимодействие термодинамики и экономики для минимизации стоимости энергопреобразующей системы: Одесса: Негоциант, 2002. 152 с.
23. Tsatsaronis G., Lin L., Pisa J., Tawfik T. Thermoeconomic design optimization of KRW-based IGCC power plant. Final Report. *Research Gate*, 1991.
24. Tsatsaronis G. Thermoeconomic analysis and optimization of energy systems. *Progress in Energy Combustion Science*. 1993. Vol. 19. P. 227–257.
25. Frangopoulos Ch. A., Sakalis G.N., Tzortzis G.J. Intertemporal and dynamic optimization of synthesis, design and operation of energy systems. *CPOTE-2016. Proceedings of the 4th International Conference on Contemporary Problems of Thermal Engineering*. Gliwice, 2016.
26. Sciubba E. A brief commented history of exergy from the beginnings to 2004. *International Journal of Thermodynamics*. 2007. Vol. 10, № 1. P. 1–26.
27. Tsatsaronis G. Comments on the paper “A Brief Commented History of Exergy from the Beginnings to 2004”. *International Journal of Thermodynamics*. 2007. Vol. 10, № 4. P. 187–192.
28. Шаргут Я., Петела Р. Эксергия. Москва: Энергия, 1968. 278 с.
29. Bejan A. Entropy generation through heat and fluid flow. New York: Wiley, 1982. 264 p.
30. Морозюк Т.В. Теория холодильных машин и тепловых насосов: Одесса: Негоциант, 2006. 721с.

31. Bejan A. Thermal design and optimization: tutorial. New York: Wiley, 1996. 542 p.
32. Kumar R. A critical review on energy, exergy, exergoeconomic and economic (4-E) analysis of thermal power plants. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2017. Vol. 20, № 1. P. 283–292.
33. Hepbasli A. Low exergy (LowEx) heating and cooling systems for sustainable buildings and societies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. Vol. 16(1). P. 73–104.
34. Tsatsaronis G., Morosuk T. Understanding and improving energy conversion systems. *International Journal Exergy*. 2012. Vol. 11, № 4. P. 518–542.
35. Бродянский В.М., Фратшер В., Михалек К. Эксергетический метод и его приложения. Москва: Энергоатомиздат, 1988. 288 с.
36. Эксергетические расчеты технических систем: справ. пособие / под ред. А.А. Долинского, В.М. Бродянского. Киев.: Наукова думка, 1991. 361 с.
37. Wall G. Exergy – a Useful Concept: PhD Thesis. Chalmers University of Technology Gothenburg, Sweden, 1986.
38. Kotas T.J. The exergy method of thermal plant analysis. London: Butterworth-Heinemann Ltd, 1985. 320 p.
39. Erbay Z., Hepbasli A. Application of conventional and advanced exergy analyses to evaluate the performance of a ground-source heat pump (GSHP) dryer used in food drying. *Energy Conversion and Management*. 2014. Vol. 78. P. 499–507.

40. Морозюк Т. Новый этап в развитии эксергетического анализа. *Холодильна техніка та технологія*. 2014. №4 (150). С. 13–17.
41. Szargut J., Morris D.R., Steward F.R. Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical processes. New York: Hemisphere, 1988. 332 p.
42. Edgerton R.H. Available energy and environmental economics. Toronto: D.C. Heath, 1982.
43. Янговский Е.И. Потoki энергии и эксергии. Москва: Наука, 1988. 144 с.
44. Rant Z. Exergie, ein neues Wort für ‘technische Arbeitsfähigkeit’. (Exergy, a New Word for Technical Available Work). *Forschungen im Ingenieurwesen*. 1956. Vol. 22. P. 36 – 37.
45. Tsatsaronis G. Strengths and limitations of exergy analysis. *Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on thermodynamics and the Optimization of Complex Energy Systems, Neptun, Romania, July 13–24, 1998*. Kluwer Academic Publishers. 1998. P. 93–100.
46. Morosuk T., Tsatsaronis G. Strengths and limitations of advanced exergetic analyses. *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, San Diego, California (USA)*. 2013.
47. Morosuk T., Tsatsaronis G. Advanced exergetic evaluation of refrigeration machines using different working fluids. *Energy*. 2009. Vol. 34. P. 2248–2258.
48. Morosuk T., Tsatsaronis G. New approach to the exergy analysis of absorption refrigeration machines. *Energy*. 2008. Vol. 33. P. 890–907.

49. Sciubba E. Beyond thermoeconomics. The concept of extended exergy accounting and its application to the analysis and design of thermal systems. *International Journal Exergy*. 2001. Vol. 2. P. 68–84.

50. Tsatsaronis G., Morosuk T. Advanced exergoeconomic evaluation and its application to compression refrigeration machines. *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Seattle (USA)*. 2007.

51. Morosuk T., Tsatsaronis G. Advanced exergy analysis for chemically reacting systems-application to a simple open gas-turbine system. *International Journal Thermodynamics*. 2009. Vol. 12. P. 105–111.

52. Tsatsaronis G., Morosuk T. A general exergy-based method for combining a cost analysis with an environmental impact analysis. part I – theoretical development. *IMECE-2008. Proceedings of International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Boston, Massachusetts, USA, October 31-November 6, 2008*. P. 453 - 462.

53. Tsatsaronis G., Morosuk T. Advanced exergy-based methods used to understand and improve energy-conversion systems. *CPOTE-2016. Proceedings of the 4th International Conference on Contemporary Problems of Thermal Engineering, Gliwice – Katowice: The Silesian University of Technology Institute of Thermal Technology, September 14-16, 2016*. P. 75 – 89.

54. Meyer L., Tsatsaronis G., Buchgeister J., Schebek L. Exergoenvironmental analysis for evaluation of the environmental impact of energy conversion systems. *Energy*. 2009. Vol. 34, № 1. P. 75–89.

55. Dincer I., Rosen M.A. Exergy: energy, environment, and sustainable development: 2nd Edition. Elsevier Science, 2012. 576 p.

56. Branchini L. Waste-to-Energy: Advanced Cycles and New Design Concepts for Efficient Power Plants. *Springer*. 2016. 143 p.

57. Goedkoop M., Effting S., Collignon M. The Eco-indicator 99. A damage oriented method of Life Cycle Impact Assessment. Manual for Designers. *Product ecology consultants*. 2000. 34 p.

58. Johnke B. Emissions from waste incineration. Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories. *Conference Paper, Kanagawa, Japan: Institute for Global Environmental Strategies for the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 2002. P. 455-468. URL: <http://www.ipee-nggip.iges.or.jp/public/gp/gpg-bgp.html> (date of treatment: 20.04.2019).

59. Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4th December 2000 on the incineration of waste (Директива 2000/76/ЄС від 4 грудня 2000 року «Щодо спалювання відходів») // База даних законодавство Європейського союзу. URL: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32000L0076:EN:NOT> (дата звернення: 15.04.2019).

60. Немировский И.А. Переработка ТБО: проблемы и достоинства. Часть 1. *Энергосбережение, энергетика, энергоаудит*. 2011. №6. С. 46-53. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/ecsee\\_2011\\_6\\_9](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ecsee_2011_6_9) (дата обращения: 20.04.2019).

61. Утилизация и переработка твердых бытовых отходов: учеб. пособ. / А.С. Клинков и др. Тамбов : ФГБОУ ВПО «ТГТО», 2015. 188 с. URL:



<http://www.tstu.ru/book/elib/pdf/2015/sokolov-t.pdf> (дата  
22.04.2019).

62. Примська С. О. Розробка нових технологічних процесів очищення газу від оксидів азоту на синтетичних цеолітах : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.17.01 / Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т". Київ, 2011. 21 с.

63. Очистка викидних газів від оксидів сульфуру та азоту (II) на штучних цеолітах / С.О. Примська та ін. Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехн. ін-т". 2010. № 667. С. 223-226.

64. Sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>): веб сайт. URL: [http://www.uwosh.edu/faculty\\_staff/gutow/Chem\\_371\\_S12/Kayla\\_Casey\\_Diamond/SO2%20website/SO2%20website.html](http://www.uwosh.edu/faculty_staff/gutow/Chem_371_S12/Kayla_Casey_Diamond/SO2%20website/SO2%20website.html) (date of treatment: 25.04.2019).

65. Примська С.О., Безносик Ю.О., Статюха Г.О., Решетіловський В. П. Перспективи очистки викидних газів теплоенергетики на синтетичних цеолітах. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2010. № 10. С. 70–77.

66. Розроблення стартап-проекту: Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / за ред. А.О. Гавриша. Київ : Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т". Київ, 2016. 28 с.

## ДОДАТОК А

Таблиця 1. – Термодинамічні параметри запропонованої ТЕЦ

Потік №	Робоча рідина	Розхід	Темп.	Тиск	Ентальпія	Ентропія	Е <sub>фіз</sub>	Е <sub>хім</sub>	Е <sub>tot</sub>
		[кг/с]	[°C]	[бар]	[кДж/кг]	[кДж/кг К]	[МВт]	[МВт]	[МВт]
1	Повітря	110	7,40	0,99	7	6,84	0,00	0,58	0,58
2	Повітря	110	380	13,51	392	6,96	38,86	0,58	39,44
3	Повітря	110	440	13,51	456	7,05	43,00	0,58	43,58
4	Газ	2,96	7,40	13,51	50031	10,14	1,12	153,58	154,70
5	Димовий газ	113	1446	13,00	1753	8,40	155,83	3,37	159,20
6	Димовий газ	113	750	1,18	852	8,44	52,59	3,37	55,96
7	Димовий газ	113	699	1,16	790	8,38	47,38	3,37	50,74
8	Димовий газ	113	554	1,16	615	8,19	33,78	3,37	37,15
9	Димовий газ	113	165	1,15	175	7,47	6,67	3,37	10,03
10	Повітря	152	7,40	0,99	7	6,84	0,00	0,80	0,80
11	Повітря	152	21,06	1,15	21	6,85	1,90	0,80	2,70
12	Димовий газ	265	84,54	1,15	87	7,15	6,51	3,26	9,76
13	ТПВ	30	7,40	1,15	12179	0,99	0,00	380,92	380,92
14	Шлам	1,17	150	1,15	12499	0,36	0,03	0,00	0,03
15	Димовий газ	294	1100	1,15	1340	8,88	248,45	19,86	268,31
16	Амоніак	0,01	7,40	0,99	18688	11,20	0,00	0,28	0,28
17	Димовий газ	294	1100	1,15	1341	8,88	248,48	19,87	268,34
18	Димовий газ	294	422	1,15	474	8,02	64,15	19,87	84,02
19	Димовий газ	294	275	1,14	304	7,74	36,56	19,87	56,43
20	Димовий газ	294	120	1,14	129	7,37	15,96	19,87	35,83

## Продовження таблиці 1.

21	Димовий газ	0,15	120	1,14	95	5,32	0,00	0,34	0,34
22	Димовий газ	294	120	1,09	130	7,38	14,88	19,62	34,49
23	Димовий газ	0,07	120	1,09	77	4,05	0,00	0,34	0,34
24	Димовий газ	294	120	1,04	130	7,40	13,74	19,31	33,05
25	Шлам	0,02	120	1,04	97	0,29	0,00	0,00	0,00
26	Димовий газ	294	120	0,99	130	7,41	12,56	19,31	31,86
27	Пара	143	370,25	35,00	3153	6,74	181,36	7,17	188,53
28	Пара	112	178,83	6,00	2803	6,87	98,88	5,63	104,51
29	Пара	112	260	5,95	2978	7,23	107,23	5,63	112,86
30	Пара	112	17,50	0,02	2212	7,62	8,45	4,90	13,34
31	Пара	10	178	6,00	2803	6,87	9,27	0,53	9,80
32	Пара	20	178	6,00	2803	6,87	17,77	1,01	18,79
33	Вода	20	80	2,00	335	1,08	0,68	1,01	1,69
34	Вода	112	17,50	0,02	73	0,26	0,07	5,63	5,70
35	Вода	112	17,51	2,00	73	0,26	0,10	5,63	5,73
36	Вода	132	27,03	2,00	113	0,40	0,38	6,64	7,02
37	Вода	132	119	2,00	500	1,52	9,91	6,64	16,55
38	Вода	132	119	6,00	500	1,52	9,97	6,64	16,61
39	Вода	143	158,8	6,00	670	1,93	18,52	7,17	25,69
40	Вода	143	159,3	35,10	674	1,93	19,02	7,17	26,19
41	Вода	143	236,6	35,05	1021	2,67	39,14	7,17	46,31
42	Пара	143	242,6	35,05	2802	6,12	155,71	7,17	162,88
43	Вода	11302	7,40	0,99	31	0,11	0,00	564,65	564,65
44	Вода	11302	12,50	0,49	52	0,19	1,60	564,65	566,25